



Eco-conception et développement des pales d'éoliennes en matériaux composites

Brahim Attaf*

Expert en Structure Composites, Région PACA, France

Résumé - *Dans l'industrie des énergies renouvelables, la conception des pales d'éoliennes en matériaux composites doit répondre aux nouvelles réglementations mises en vigueur en terme du respect de l'environnement et de la protection de la santé et ce, en parallèle de l'assurance qualité. Avec cette idée comme objectif, la présente étude a pour but, d'une part, la modernisation du procédé de fabrication des pales d'éoliennes avec la prise en compte des aspects d'éco-conception; et d'autre part, le développement et l'amélioration des procédures de qualification, de réparation et de recyclage après la fin de vie de ces pales.*

1. INTRODUCTION

Etant donné que l'énergie éolienne participe durablement 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.

De ce fait, l'obtention d'une puissance élevée dépend essentiellement de la surface balayée par les pales en rotation; ceci nécessite donc des pales de grandes tailles. Mais ces derniers éléments critiques sont sujets, lors de service, à des problèmes de vibrations, de stabilité et de résistance, pouvant être résolus en ayant recours aux matériaux composites.

Dans l'industrie moderne des pales d'éoliennes, les matériaux composites à base de fibres occupent une place prépondérante (95 %). En effet, ces matériaux présentent des avantages attractifs résidant principalement dans les bonnes caractéristiques mécaniques en terme de rigidité et de résistance spécifiques [1, 2]. A ces avantages vient s'ajouter la prise en compte de la notion d'éco-conception.

Cette dernière se caractérise par la protection de l'environnement et de la santé dans toutes les étapes de conception et ce, aux cotés de critères classiques tels que: le coût, la qualité, la faisabilité technique et les attentes du marché de la pale d'éolienne.

Le but de cet article est de présenter les grandes étapes d'éco-conception permettant l'optimisation des paramètres matières et procédés, utilisés dans la technologie de fabrication des pales d'éoliennes en matériaux composites. Les résultats ainsi obtenus permettront d'aboutir à des conclusions pouvant être exploitées par l'industrie moderne d'éoliennes (éco-industrie).

Le but est de réaliser des pales résistantes sans aucun effet néfaste aux conditions sévère d'environnement (fortes rafales, par exemple), mais aussi à différents types de chocs auxquels elles pourront être exposées durant leur cycle de service.

* b.attaf@wanadoo.fr

2. MATERIAUX ET CALCUL STRUCTURAL

La conception des pales d'éoliennes en matériaux composites doit répondre aux exigences normatives définies dans le document ISO 2394 en termes de calcul de structures (charges, résistance, vibrations, fatigue, sécurité,...) et des tests de vérification statique et dynamique.

2.1 Matériaux et caractérisation

Les matériaux choisis doivent répondre aux objectifs techniques d'assurance qualité avec la prise en compte des nouvelles réglementations vis-à-vis du respect de l'environnement. Il est donc important de choisir avec prudence: (i) la classe des fibres; (ii) la classe de la matrice; (iii) la mousse constituant le sandwich (mousse adaptée à la mise en œuvre).

Les caractéristiques mécaniques des composites sélectionnés sont déterminées après plusieurs essais de traction, compression, flexion, torsion, délaminage, flambage, fatigue, contrôle de fibres en volume, etc.

Les valeurs obtenues seront comparées aux valeurs calculées en tenant compte des aspects environnementaux et sanitaires qui peuvent être caractérisés par une approche d'éco-caractérisation et des éco-coefficients représentatifs de la fonction d'éco-conception et [3-5].

2.2 Architecture structurale de la pale (sections et dimensions)

En collaboration avec les institutions spécialisées en mécanique de fluide et aérodynamique, le profil standardisé de la pale pourra être déterminé et validé. Ce dernier est défini par son bord d'attaque, son bord de fuite et sa corde (Fig. 1).



Fig. 1: Profil standardisé d'une pale d'éolienne

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 techno-scientifique entre la position du centre *élastique* et le centre de *gravité* doit faire l'objet d'une distinction claire et précise. Vient ensuite, la taille de la pale qui doit répondre à un cahier de charges donné.

La détermination de l'épaisseur relative à chaque tronçon, l'orientation adéquate des fibres et la séquence d'empilement pour chaque tronçon font appel à un calcul de vérification de la tenue mécanique de la pale.

2.3 Analyses structurales

L'état du problème, illustré par la figure 2, est du type hygrothermomécanique, car la structure de la pale est supposée soumise à trois types de sollicitations d'origine:

mécanique (forces de rafale, tempêtes, ..), thermique (variation de la température) et hygrométrique (variation de l'humidité).

Les équations constitutives gouvernant le comportement hygrothermomécanique d'un composite stratifié (faces extrados et intrados) et sans prise en compte du cisaillement transverse, sont exprimées d'après [6, 7] par la forme matricielle compacte suivante.

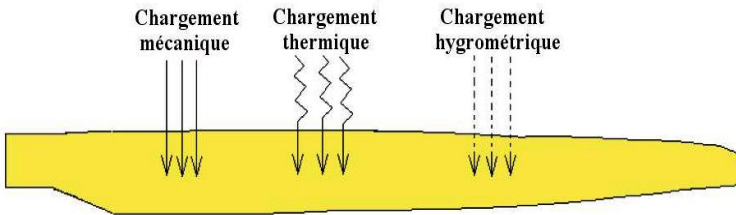


Fig. 2: Pales soumise à un chargement de type hygrothermomécanique

$$\begin{Bmatrix} N \\ \dots \\ M \end{Bmatrix}_{xy} = \begin{bmatrix} A & : & B \\ \dots & & \dots \\ B & : & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \dots \\ \kappa \end{Bmatrix}_{xy} - \begin{Bmatrix} N^{\Delta T} \\ \dots \\ M^{\Delta T} \end{Bmatrix}_{xy} - \begin{Bmatrix} N^{\Delta m} \\ \dots \\ M^{\Delta m} \end{Bmatrix}_{xy} \quad (1)$$

où ΔT et Δm représentent respectivement les variations de la température et de l'humidité.

En plus de l'analyse statique, il est nécessaire d'entreprendre une mesure préventive qui consiste en l'analyse du comportement dynamique de la pale afin de pouvoir dégager l'ordre de grandeur des paramètres modaux (fréquences propres et déformées modales) et mettre en évidence d'éventuels problèmes de couplage. Il peut donc être intéressant, dans un premier temps, d'obtenir rapidement des résultats approchés par les méthodes classiques simplifiées.

Viennent ensuite les méthodes numériques consistant à approcher la pale par un modèle numérique qui sera résolu par la méthode des éléments finis (MEF). L'élaboration d'un tel modèle n'est pas toujours simple étant donné la forme complexe de la pale, l'anisotropie du matériau, le type de chargement et le degré de précision.

Après analyse des résultats, il s'avère nécessaire de renforcer la section de la pale par des raidisseurs longitudinaux. Dans ces conditions, une étude préliminaire doit être entreprise afin de déterminer le nombre de raidisseurs adéquats ainsi que leur position par rapport au bord d'attaque.

Dans cette optique, Attaf *et al.* [1, 8] ont développé quelques résultats pouvant être exploités par l'industrie éolienne, montrant la possibilité de réduire, en gardant la masse constante, la flèche d'une plaque composite en verre/époxy par son renforcement par un, deux voire trois raidisseurs.

D'autre part, les zones présentant un changement géométrique irrégulier, caractérisé par un passage d'une section circulaire creuse à un profil aérodynamique, révèlent la présence d'une concentration de contraintes au niveau des zones de transition (Fig. 3).

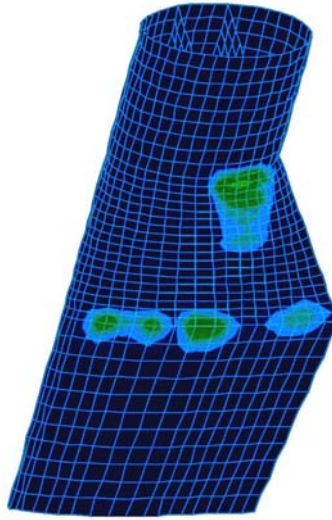


Fig. 3: Zone de transition et concentration de contraintes pour un pli interlaminaire (k)

Cependant, une attention particulière doit être portée sur ces zones (des plis en fibres de carbone en remplacement des plis en fibres de verre peuvent être suggérés, par exemple). Le critère de non-rupture de l'un quelconque des plis constituant le stratifié doit faire l'objet d'une vérification selon le critère de Tsai-Hill [6, 7].

Pour un état de contraintes planes pour un pli k ($\sigma_3^{(k)} = \tau_{13}^{(k)} = \tau_{23}^{(k)} = 0$), ce critère s'écrit:

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

- Si $\Pi < 1$, alors l'état limite du matériau n'est pas atteint.
- Si $\Pi = 1$, alors la rupture du matériau est atteinte.

Une marge de sécurité $ms(\%) = (1 - \Pi) \times 100$ peut être utilisée pour une meilleure interprétation des résultats.

La loi d'évolution de l'épaisseur du revêtement extrados et intrados, le long de l'envergure de la pale, peut être définie en fonction de la contrainte maximale en traction et de sa vitesse périphérique.

2.4 Comportement du gel-coat aux contraintes climatiques

Les éoliennes implantées en mer (offshore) et sur terre (onshore) sont exposées, selon la climatologie de la région, à des contraintes d'ordre climatique telles que les variations de température, d'humidité et les grains de sable liés aux tempêtes. Ces phénomènes naturels peuvent facilement endommager la peau de la pale (gel-coat). Cependant, une pale d'éolienne en matériaux composites est hautement durable si la couche du gel-coat qui la protège du milieu extérieur présente de bonnes caractéristiques physico-chimiques (bon module d'élasticité, bon allongement à la rupture, résistance au sablage, épaisseur adéquate, absence de porosité, ..).

Le mauvais choix de ces caractéristiques peut engendrer à court et/ou à long terme des risques de formation de cloques, de création de petites cavités, d'apparition de fissures et craquelures, engendrant ainsi un isolement du stratifié du milieu extérieur et facilitant le contact avec les phénomènes naturels (givrage, variation de la température, contact avec l'eau de mer et de pluie, tempêtes de sable, etc.). Ces risques peuvent être considérés comme les premiers facteurs accélérant la dégradation, le vieillissement et la réduction de la durée de vie d'une pale d'éolienne. Néanmoins, lors du processus de conception, une étude sur le comportement du gel-coat aux phénomènes climatiques ainsi qu'aux sollicitations d'origine hygrothermomécanique doit faire l'objet d'une étude particulière afin de prédire les effets indésirables à court et/ou à long terme.

2.5 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 étude pourra être alors effectuée sur un tronçon de la pale qui représente la zone la plus sollicitée. A cet effet, les résultants présentés par Attaf [9,10] 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 4 montre cette évolution, représentée par les courbes $\Gamma^2 = f(\Delta)$ ($\Gamma = f_i / f_{0i}$ et $\Delta = P / P_{cr1}$) pour une plaque composite.

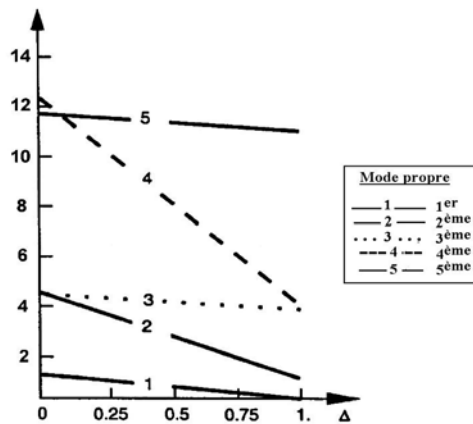


Fig. 4: Variation de Γ^2 en fonction du rapport Δ pour une plaque composite $[90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ]_s$ reposant sur quatre appuis simples, $\phi = a/b = 2.0$

2.6 Délaminage par flambage

Lors de la fabrication des pales d'éoliennes, la mauvaise imprégnation entre les plis et/ou les défauts de porosité peuvent être les causes principales susceptibles de provoquer le phénomène de délaminage. Sa présence résulte d'une séparation des plis et cause un flambage local pouvant considérablement modifier la rigidité totale de la pale ainsi que sa charge critique. Ceci peut conduire à une rupture prématurée de la pale.

De ce fait, le problème de croissance du délaminage doit faire l'objet d'une étude approfondie axée sur les faces extrados et intrados de la pale. Dans ce contexte, la figure 5 montre l'influence de la longueur de délaminage sur les charges critiques de flambement d'une plaque composite. Les effets pouvant optimisés la charge critique peuvent être identifiés et analysés.

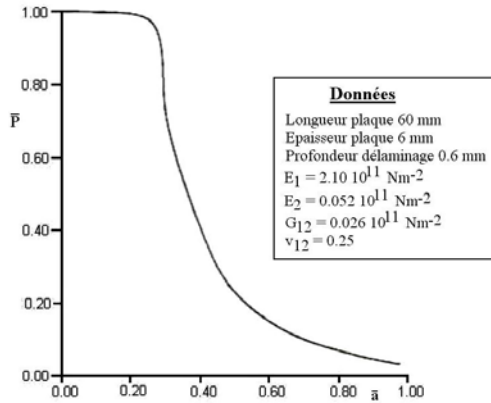


Fig. 5: Evolution de la charge critique \bar{P} en fonction de la longueur de délaminage \bar{a} pour une plaque composite dotée de la symétrie miroir $[(0^\circ)_{10}/(90^\circ)_{10}/(0^\circ)_{10}]_s$.

2.7 Equilibrages statique et dynamique des pales d'éoliennes

Dans un premier temps, une procédure d'équilibrage statique (Fig. 6) doit être développée afin de garantir le même moment statique pour toutes les pales. En effet, 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). En ce qui concerne l'équilibrage dynamique (pale en rotation), l'effet de balourd doit être totalement éliminé.

La procédure associée doit faire l'objet d'une étude expérimentale en ayant recours à un banc d'essai spécialement conçu à cet effet. Cet équilibrage permettra de garantir que toutes les pales produiront les mêmes efforts en rotation et pourront effectivement être interchangeables en cas de remplacement.

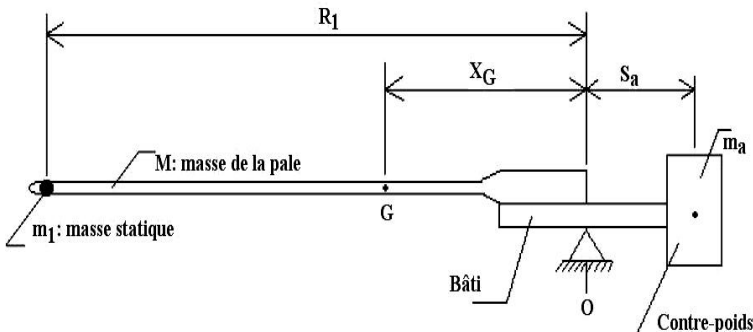


Fig. 6: Principe d'une balance statique

2.8 Calcul de la durée de vie (fatigue)

Lors de son service, la pale est sujette à des problèmes de variation de contraintes d'un cycle à un autre. Cette variation peut avoir pour conséquence une dégradation de la résistance structurale à travers les phénomènes d'accumulation de contraintes et de fatigue.

Cependant, un certain nombre d'échantillons (tronçons) doit être réalisé conformément aux principes de construction de la pale. Ces échantillons seront ensuite testés à un niveau suffisant jusqu'à rupture sous un chargement alterné. Un banc d'essai et des jauges de déformation pour effectuer de tels essais sont nécessaires. Les résultats expérimentaux obtenus permettront de chiffrer la durée de vie de la pale avec un degré de confiance suffisamment admissible. En moyenne, cette durée de vie est estimée à 20 ans.

3. PROCEDE DE FABRICATION DES PALES

Le procédé traditionnel exploité actuellement pour la fabrication des pales d'éoliennes 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 RTM (*Resin Transfer Moulding*) ou moulage par transfert de résine vient positivement pallier à ce problème.

Il présente une solution industrielle à la production des pales d'éoliennes avec une excellente qualité de finition, de meilleures caractéristiques mécaniques, un faible coût et une cadence de production modeste.

En outre, il participe à la réduction des quantités d'émission de Composés Organiques Volatils (COV), tels que le styrène. La figure 7 illustre la technologie RTM light appliquée au profil d'une pale d'éolienne.

En ce qui concerne les grandes pales d'éoliennes, l'injection se fera d'une manière séquentielle [11]. Les points d'injection sont situés sur le bord de fuite; les points d'aspiration, par contre, sont situés sur le bord d'attaque. La figure 8 schématise la méthode d'injection séquentielle et ce, en commençant par le pied de pale (partie travaillante et fortement sollicitée).

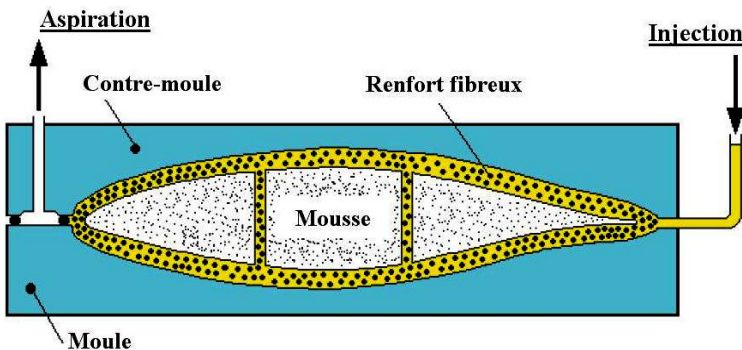


Fig. 7: Coupe transversale d'un profil de pale sous moulage par procédé RTM

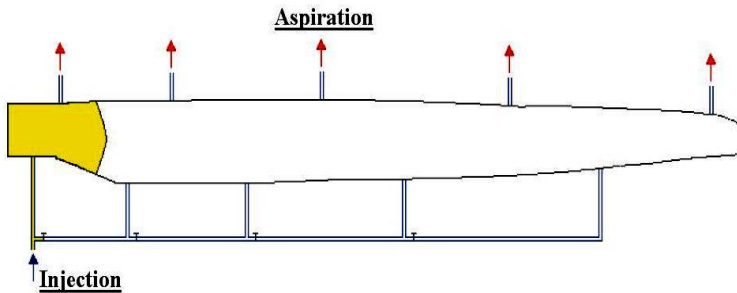


Fig. 8: Procédé d'injection séquentielle de la résine dans la technologie RTM

4. PROCEDURES DE REPARATION DES PALES

Les organismes certificateurs des pales d'éoliennes ainsi que les documents normatifs associés ne fournissent pas les procédures de réparation des pales d'éoliennes fabriquées par le procédé RTM. Cependant, des consignes de réparation et de maintenance doivent être clairement définies et normalisées afin d'être exploitées par les diverses sociétés de l'éolien. Ces consignes définissent les règles en terme de maintenance des pales qui seront de même niveau d'exigence que celles représentées par la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile) et les manuels d'organisme d'entretien, tel que le JAR (*Joint Aviation Requirements*).

5. PROCEDURE DE GESTION DE LA FIN DE VIE DES PALES (DECHETS ET RECYCLABILITE)

Etant donné que la fin de vie des pales d'éoliennes peut poser des problèmes environnementaux, il est alors important d'anticiper des réglementations futures pour la maîtrise des déchets et d'éventuelles méthodes de recyclabilité. Ces dernières doivent être conformes aux exigences du document normatif XP ISO/TR14062 (intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement des produits; 2002).

Ces exigences spécifiques au management environnemental, selon la norme ISO 1400, peuvent être intégrées à la démarche qualité.

6. QUALIFICATION DES PALES D'EOLIENNES

Cette partie consiste à qualifier par des essais statiques et dynamiques les pales d'éoliennes fabriquées par le procédé RTM. Cette qualification sera caractérisée par une vérification de la compatibilité entre le dimensionnement et les charges aérodynamiques et environnementales (température et humidité) auxquelles la pale pourra être soumise au cours de sa durée de vie. Ces essais consistent 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 susceptibles de provoquer une rupture. Ces méthodes expérimentales sont regroupées sous la nomination d'Analyse Modale Expérimentale,

effectuées par des analyseurs de signaux (FFT) et logiciels associés. L'équipement utilisé pour l'analyse modale expérimentale est illustré par la figure 9.

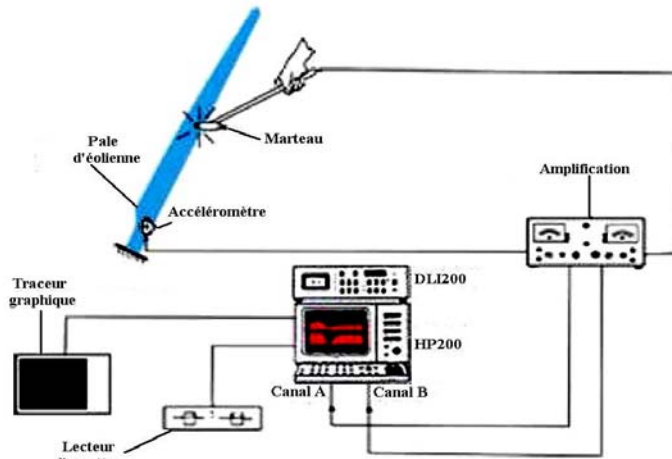


Fig. 9: Type d'équipement utilisé pour l'analyse modale expérimentale

7. CERTIFICATION DES PALES D'ÉOLIENNES

La figure 10 montre les principales étapes relatives à la procédure de certification [12].

La certification de la pale d'éolienne peut être délivrée par un organisme compétent tel que Germanischer Lloyd conformément à la procédure IEC 61400-1. Cette certification est effectuée par des audits externes qui sont essentiellement axés sur:

- l'évaluation des documents et rapports de conception,
- l'évaluation du site et de ses procédés de fabrication,
- l'évaluation des équipements destinés aux essais statiques, dynamiques, fatigue,
- l'évaluation des résultats numériques et expérimentaux associés aux pales prototypes,
- le contrôle de la qualification des personnes et opérateurs intervenants dans le processus de conception,
- l'évaluation des systèmes de management de la qualité.

8. RECOMMANDATIONS

La carte des vents de l'Algérie [13] montre l'existence de huit zones ventées favorables à l'implantation des parcs éoliens.

Ces zones sont divisées selon la climatologie de chaque région en trois catégories: (1) zones sur le littoral; (2) zones sur les hauts plateaux et (3) zones en sites sahariens.

Pour les zones sur le littoral qui se caractérisent généralement par une forte densité de population, l'implantation d'éoliennes de grandes tailles sur mer (offshore) est un choix meilleur. Par contre, pour les autres zones, l'implantation des éoliennes terrestres doit faire l'objet d'une étude techno-économique surtout pour les sites sahariens.

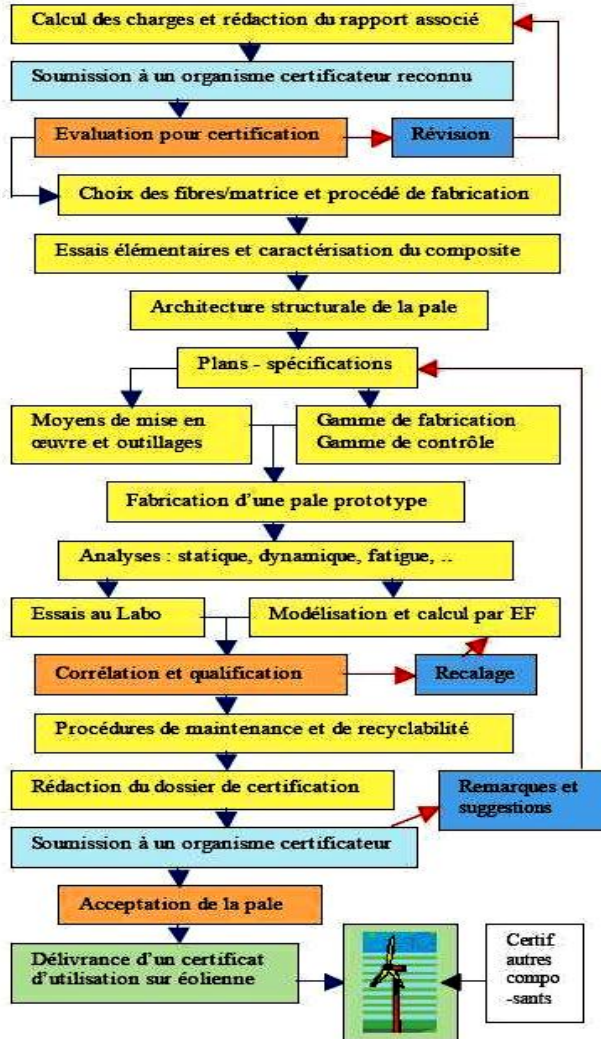


Fig. 10: Procédure de certification d'une pale d'éolienne

La solution retenue sera d'une part guidée par divers critères technologiques (éco-conception, poids minimum, meilleure durée de vie, matériaux de haute performance,..) et d'autre part, elle doit être couplée avec les exigences économiques (éloignement, transport, économie de main-d'œuvre, absence de connexion avec les réseaux électriques,..).

Le choix de l'éolienne doit impérativement prendre en compte les conditions météorologiques extrêmes propres à la zone d'implantation considérée. Les machines destinées au sud-ouest du Sahara algérien doivent être conçues de manière à résister sans aucun effet néfaste aux différentes élévations de température et aux diverses tempêtes de sable qui peuvent endommager la structure externe de l'éolienne et son

système de transmission. Cependant, les futures normes et codes de conception des éoliennes doivent tenir compte de ces aspects.

Comme la structure d'une éolienne est formée d'un assemblage de composants aux formes géométriques complexes tels que: nacelle, pylon et pales; l'étude de cet ensemble est souvent complexe.

Cependant, la méthode de sous structuration est recommandée car elle permet, selon certains critères, de séparer les composantes structurales de l'ensemble (en gardant les mêmes conditions aux limites) et d'analyser leurs comportements statiques et dynamiques; ceci en vue de prévoir les modifications nécessaires permettant de réduire et de remédier aux éventuelles faiblesses structurales. Par exemple, des modifications géométriques de l'extrémité de la pale permettent de réduire les gênes sonores.

9. CONCLUSION

Pour minimiser l'évolution des effets du réchauffement de la planète et laisser aux générations futures un environnement meilleur, les pays en voie de développement sont encouragés à faire progresser et développer la filière des matériaux composites et ce, dans l'objectif d'établir une activité de recherche et d'innovation dans le domaine des énergies renouvelables et particulièrement de l'énergie éolienne.

Afin de respecter les aspects d'éco-conception et le concept du développement durable dans le processus de fabrication des pales d'éoliennes en matériaux composites, les entreprises s'engageant sur la voie de mise en œuvre d'un système d'analyse environnementale sont encouragées à développer et atteindre les principaux objectifs suivants:

- Développer des procédés de fabrication propres en réduisant les émissions de COV;
- Développer de nouveaux matériaux de haute performance à coûts maîtrisés et respectueux de l'environnement;
- Créer des normes spécifiques à la qualification, la réparation et la gestion de la fin de vie des pales d'éoliennes;
- Etablir une activité dynamique entre l'université, les centres de recherche et l'industrie;
- Transférer la technologie par la formation et l'information aux futurs ingénieurs actifs dans la filière éolienne.

10. REFERENCES

- [1] B. Attaf, '*Vibration and Stability Analyses of Unstiffened and Stiffened Composites Plates*', PhD Thesis, University of Surrey, UK, 1990.
- [2] L. Hollaway and B. Attaf, '*On the Vibration of Glass/Polyester Composite Stiffened and Unstiffened Rectangular Plates*', Chinese Society of Aeronautics, 7th Int. Conf. on Composite Materials, pp. 435 – 444, Beijing, October 1989.
- [3] B. Attaf, '*Towards the Optimisation of the Ecodesign Function for Composites*', JEC Composites, N°42, pp. 58 – 60, July-August 2008,
- [4] B. Attaf, '*Eco-Characterisation of Composite Materials*', JEC Composites, N°34, pp. 58 – 60, July-August 2007.

- [5] B. Attaf, '*Probability Approach in Ecodesign of Fibre-Reinforced Composite Structures*', Congrès Algérien de Mécanique, Biskra, Algérie, Nov. 2009.
- [6] O. Saarela, '*Computer Programs for Mechanical Analysis and Design of Polymer Matrix Composites*', Prog. Polym. Sci., Vol.19, pp.171-201, 1994.
- [7] R.M. Jones, '*Mechanics of Composite Materials*', Scripta, Book Company, Washington, D.C., 1975.
- [8] B. Attaf and L. Hollaway, '*Vibrational Analyses of Glass Reinforced Polyester Composite Plates Reinforced by a Minimum Mass Central Stiffener*', Composites, Vol. 21, N°5, pp. 425 – 430, Sept.1990.
- [9] B. Attaf and L. Hollaway, '*Vibrational Analyses of Stiffened and Unstiffened Composite Plates Subjected to In-Plane Loads*', Composites, Vol. 21, N°2, pp. 117 – 126, 1990.
- [10] B. Attaf, '*Effects of Laminate Stacking Sequence on the Free Vibration of Carbon/Epoxy Composite Plates Subjected to In-Plane Loads*', La Recherche Aérospatiale, N°2, pp. 149 – 153, 1996.
- [11] P. Desfilhes, '*Composites - L'Automatisation des Grandes Pièces*', L'Usine Nouvelle, N°2819, pp. 48 – 50, Avril 2002.
- [12] M. Woebbeking and C. Nath, '*Guideline for the Certification of Wind Turbines*', Germanischer Lloyd, WindEnergie GmbH, 2003.
- [13] N. Kasbadji Merzouk, '*Quel Avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie*', Bulletin des Energies Renouvelables, N°14, pp. 6 – 7, Décembre 2008.