

Analyse de fiabilité d'une pale d'éolienne

Reliability analysis of a wind turbine blade

Jaouad Smily¹, Bouchaib Radi², Ismaïl Sossey-Alaoui³

¹ Laboratoire IMII, FST Settati, Maroc, j.smily@uhp.ac.ma

² Laboratoire IMII, FST Settati, Maroc, bouchaib.radi@yahoo.fr

³ Département GMP-MI, EST Fès, Maroc, i.sosseyalaoui@gmail.com

RÉSUMÉ. Dans le cadre du développement durable, face au double défi planétaire posé par l'épuisement imminent des ressources énergétiques fossiles et l'impact négatif de ces dernières sur l'environnement, l'utilisation des énergies renouvelables devient une bonne alternative. Aujourd'hui, l'installation de parcs éoliens dans le monde entier est en plein essor, et la recherche aérodynamique sur les éoliennes est hautement spécialisée. Grâce à la dynamique des fluides numérique (CFD), il est possible d'évaluer l'influence des charges sur les performances aérodynamiques de l'éolienne. Pour améliorer ses performances et sa fiabilité, une bonne modélisation de l'écoulement de l'air autour de l'éolienne est très importante. Dans cet article, l'étude est divisée en trois parties : Premièrement, l'étude aérodynamique de la pale a été réalisée avec ANSYS CFX. Deuxièmement, l'analyse modale en mode précontraint a été effectuée pour trouver les fréquences naturelles de la pale avec ANSYS MECHANICAL. La dernière partie est consacrée à l'étude de fiabilité de la pale de l'éolienne avec les méthodes FORM et SORM développées avec un code MATLAB.

ABSTRACT. In the context of sustainable development, faced with the dual global challenge of the imminent depletion of fossil energy resources and the negative impact of fossil fuels on the environment, the use of renewable energy is becoming a good alternative. Today, the installation of wind farms around the world is booming, and aerodynamic research on wind turbines is highly specialized. Using Computational Fluid Dynamics (CFD), it is possible to assess the influence of loads on the aerodynamic performance of the wind turbine. To improve its performance and reliability, a good modelling of the airflow around the turbine is very important. In this paper, the study is divided into three parts: Firstly, the aerodynamic study of the blade was carried out with ANSYS CFX. Secondly, the modal analysis in pre-stressed mode was performed to find the natural frequencies of the blade with ANSYS MECHANICAL. The last part is devoted to the study of the reliability of the wind turbine blade with FORM and SORM methods developed with a MATLAB code.

MOTS-CLÉS. Énergie éolienne, ANSYS, Fiabilité, FORM SORM.

KEYWORDS. Wind energy, ANSYS, Reliability, FORM SORM.

1. Introduction

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie utilisées par l'humanité. Aujourd'hui avec l'impact négatif de l'énergie fossile sur l'environnement, l'installation des parcs éoliens partout dans le monde connaît un essor considérable. Lu et al [LU 09] ont mentionné que 25% de l'électricité sera produite par l'énergie propre d'ici 2025. L'énergie éolienne joue un rôle important, dans ce contexte l'éolienne est considérée comme l'un des meilleurs outils pour extraire l'énergie du vent. Dans la littérature, l'éolienne à axe horizontal (HAWT) est considérée comme l'un des meilleurs types d'éolienne pour extraire efficacement les ressources du vent inépuisables. Malgré le développement considérable des outils numériques, l'étude de ce type de structure reste une tâche très délicate. En termes de production d'énergie, l'éolienne est l'une des ressources énergétiques renouvelables les plus prometteuses.

Au Maroc à l'instar de plusieurs pays, a investi et il investit encore dans les énergies propres. Dans le cadre de sa stratégie énergétique, le Maroc s'est engagé dans un vaste programme éolien, pour accompagner le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique dans le pays. Le Projet Marocain Intégré de l'Energie Eolienne a permis au pays d'augmenter la part de l'énergie éolienne dans la capacité électrique totale à environ 14% [SM 21].

L'objectif de ce papier porte principalement sur l'étude fiabiliste de la pale de l'éoliennes en présence d'incertitude. Le manque de précision des paramètres, dans la conception des problèmes mécaniques, donne lieu à des résultats peu fiables. Par conséquent, la prise en compte des incertitudes des paramètres dans les calculs est cruciale pour garantir la fiabilité et la robustesse de la structure. Pour se faire on a développé un code MATLAB basé sur les deux méthodes de l'étude de la fiabilité FORM et SORM. En termes de production d'énergie, l'éolienne est l'une des ressources énergétiques renouvelables les plus prometteuses. Au Maroc à l'instar de plusieurs pays, a investi et il investit encore dans les énergies propres. Dans le cadre de sa stratégie énergétique, le Maroc s'est engagé dans un vaste programme éolien, pour accompagner le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique dans le pays. Le Projet Marocain Intégré de l'Energie Eolienne a permis au pays d'augmenter la part de l'énergie éolienne dans la capacité électrique totale à environ 14%.

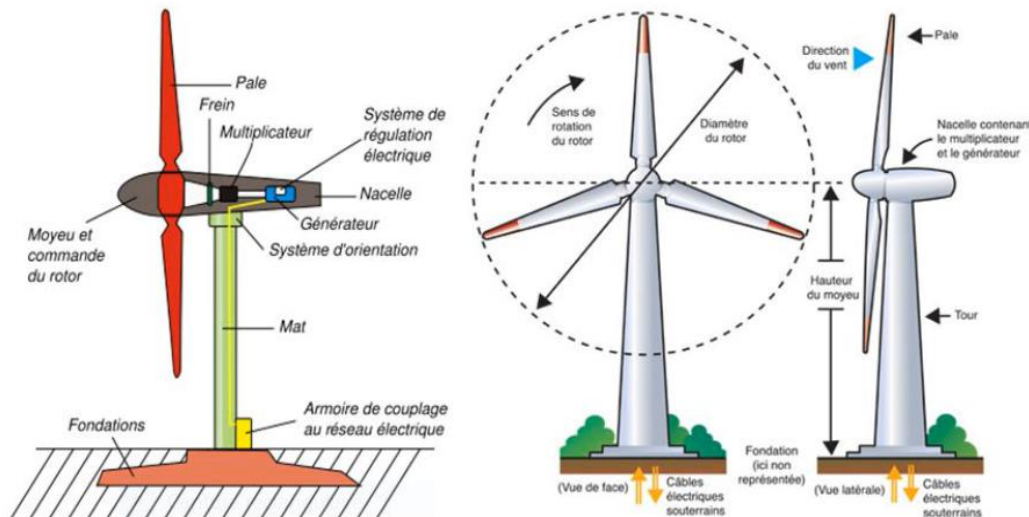


Figure 1. Composition d'une éolienne à axe horizontal (HAWT)

2. Position du problème

Le problème de l'interaction fluide-structure (IFS) est une classe de problèmes avec dépendance mutuelle entre les parties de la mécanique du fluide et la mécanique des structures. Le comportement de l'écoulement dépend du mouvement et de la déformation de la structure. Le mouvement de même que la déformation de la structure dépendent du comportement du fluide agissant sur cette dernière. On voit que la IFS est presque partout dans l'ingénierie, et dans notre vie quotidienne. Les effets IFS deviennent importants et visible lorsque la dépendance entre l'influence et la réponse devient plus forte, on parle de force de couplage qui peut être définie comme le niveau des interactions entre les deux milieux. Un couplage est dit fort si les échanges entre les deux milieux sont importants, et il est faible si l'effet d'un des milieux est prépondérant par rapport à l'autre. Les méthodes partitionnées de résolution des interactions fluide-structure font intervenir un solveur dédié pour la portion fluide de la simulation et un autre solveur pour la portion solide de la simulation [MA 15]. Ces solveurs sont lancés de manière séquentielle et les extrants du premier sont utilisés comme conditions limite pour le second. Les simulations présentant un faible couplage entre les deux domaines de calcul peuvent être réalisées par une approche unidirectionnelle. Par exemple, les données de pression et de cisaillement calculées à un pas de temps donné par le solveur fluide peuvent être appliquées comme chargement à la structure et son déplacement est calculé avant de passer au pas de temps suivant. Inversement, lorsque la simulation fait intervenir un couplage fort, une boucle de couplage est nécessaire pour la résolution de chaque pas de temps. Pendant ces boucles de couplage, les déplacements calculés par le solveur structurel sont transférés au solveur fluide qui lui, transfère les

champs de force fluide calculés en retour. Cette boucle s'arrête lorsque la convergence sur les champs transférés est atteinte.

Le mouvement associé à l'écoulement proprement dit est décrit par les équations de quantité de mouvement aussi appelées « équations de Navier-Stokes ». Elles peuvent être résumées sous leur forme vectorielle par l'équation suivante :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (1)$$

où « ρ » correspond à la densité du fluide. Cette dernière est constante et uniforme vu la condition d'incompressibilité. « p » représente le champ scalaire de la pression, « μ » la viscosité dynamique du fluide et « t » le temps.

Dans les problèmes de mécanique des structures, en général, la tâche est de déterminer les déformations des corps solides, qui résultent de l'action de divers types de forces. A partir de là, par exemple, les contraintes dans le corps peuvent être déterminées, qui revêtent une grande importance pour de nombreuses applications. Pour les différentes propriétés des matériaux il existe un grand nombre de lois matérielles, qui ainsi que les équations d'équilibre conduisent à systèmes d'équations complexes diversifiés pour détermination des déformations (ou déplacements). L'équation de base du mouvement est donnée par suit :

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f(t) \quad (2)$$

où m est une matrice de masse structurale, \ddot{u} est un vecteur d'accélération, c est une matrice d'amortissement structurel, \dot{u} est un vecteur vitesse, k est une rigidité structurelle matrice, u est un vecteur de déplacement, f est une force vecteur qui est une fonction du temps, l'amortissement de la structure n'est pas impliqué dans le modèle d'éléments finis donc l'équation directrice ci-dessus est modifiée est devient :

$$m\ddot{u} + ku = f(t) \quad (3)$$

Dans ce qui suit on va présenter les deux méthodes Volumes finis et Eléments finis pour résoudre les équations du fluide et du solide. Dans un premier lieu on suppose que l'IFS est faible et on procède alors à un couplage unidirectionnel.

3. Fiabilité

La fiabilité est définie étant la capacité d'une structure à atteindre un objectif souhaité dans des conditions opérationnelles et extrêmes, pendant sa durée de vie prévue. En effet, quelle que soit la rigueur de la conception de nos appareils, il existe toujours une possibilité de situations imprévues pouvant entraîner une panne. La fréquence d'apparition de tels défauts ainsi que le prix de leur réparation influent directement la rentabilité d'un projet. Des taux de défaillance plus élevés ou une augmentation du prix par action de réparation entraîneront à la fois une augmentation des coûts d'exploitation et de maintenance. L'analyse de fiabilité donne au concepteur l'occasion de traiter ces aspects. La réalisation d'une analyse de fiabilité fournit des informations sur la fréquence prévue des pannes et peut identifier les facteurs qui influent sur la fiabilité. L'utilisation d'un modèle de fiabilité ajoute un niveau de complexité à l'analyse car les variables sont représentées avec leurs distributions statistiques.

La procédure de réalisation de l'analyse de fiabilité peut être résumée comme suit :

- a) Identification des variables incertaines et la définition de leurs distributions statistiques
- b) Obtention de la probabilité de défaillance du système définie par la fonction de performance
- c) détermination de la probabilité de défaillance du système en fonction des indicateurs de fiabilité

Plusieurs phénomènes physiques peuvent être à l'origine d'une défaillance : la plastification, la fatigue, le fluage, la présence de fissures, de grandes déformations, etc. Chacun ou la combinaison de ces phénomènes entraîne un mode ou un scénario de défaillance. Pour simplifier les notations, nous nous plaçons dorénavant dans le cas d'une structure ne possédant qu'un seul mode de défaillance. La modélisation probabiliste d'un mode de défaillance se fait par la définition d'une fonction $G(X)$ appelée fonction d'état limite ou fonction de performance. Notons que par construction la fonction $G(X)$ est elle-même une variable aléatoire. Ainsi, on a :

- $G(X) > 0$ définit le domaine de sécurité de la structure ;
- $G(X) < 0$ définit le domaine de défaillance de la structure ;
- $G(X) = 0$ définit la surface d'état limite.

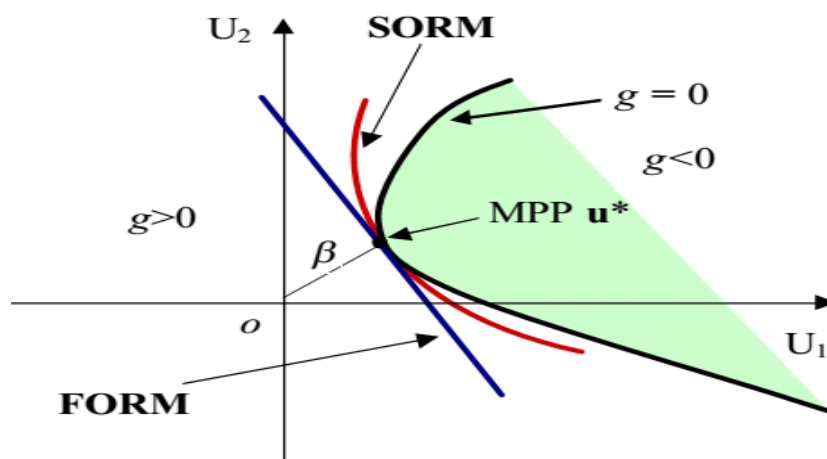


Figure 2. Analyse de fiabilité

La structure possède donc deux états possibles : un état de bon fonctionnement et un état de défaillance, séparés par une frontière dite d'état limite. Notons toutefois que la réalité est souvent bien plus complexe que cette modélisation binaire.

La fiabilité R (en anglais, reliability) d'une structure est conventionnellement définie de la façon suivante :

$$R = 1 - P_f \quad (4)$$

où la probabilité de défaillance P_f (en anglais, probability of failure) correspond à la probabilité d'occurrence de l'événement $G(X) \leq 0$:

$$P_f = P(G(\{X\}) \leq 0) \quad (5)$$

Cet indicateur de confiance constitue le résultat essentiel d'un calcul fiabiliste. Si l'on introduit la densité de probabilité conjointe f_X des variables aléatoires X du modèle, la probabilité de défaillance s'écrit alors comme suit :

$$P_f = \int_{D_f} f_X(x) \prod_{i=1}^k dx_i \quad (6)$$

Il est très rare que cette intégrale puisse être étudiée analytiquement voire numériquement. Dans la pratique, on ne dispose pas en général de la densité de probabilité conjointe du vecteur X , on doit se contenter le plus souvent des lois marginales relatives à chaque variable x_i et à certaines informations sur leur corrélation. De plus, le domaine d'intégration D_f peut être défini de façon implicite et complexe selon le modèle mécanique retenu.

Diverses méthodes de résolution ont ainsi été développées pour pallier ces difficultés. On distingue deux grandes familles : les méthodes basées sur des simulations et celles recourant à une approximation. On se propose de présenter ici les grandes lignes des deux méthodes utilisées dans le cadre de cette étude.

FORM (First Order Reliability Method) et SORM (second Order Méthode de fiabilité) sont deux méthodes très efficaces pour calculer la fiabilité, elles sont basées sur la recherche du point de défaillance le plus probable (MPFP). Ils permettent de calculer la probabilité de panne ou la fiabilité de l'indice de fiabilité [EL 13]. La méthode FORM permet de calculer P_f à partir de cette expression :

$$P_f = \phi(-\beta) \quad (7)$$

où ϕ est la fonction de distribution normale centrée réduite. La méthode SORM permet aussi de calculer P_f mais en différenciant la FORM méthode, à partir de l'expression suivante :

$$P_f = \phi(-\beta) \left(\prod_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\sqrt{1+\beta k_i}} \right) \quad (8)$$

où k_i sont les courbes principales de la fonction G dans MPFP. La fiabilité peut être calculée par plusieurs méthodes, Hasofer et Lind ont proposé de calculer β dans l'espace des variables statistiquement indépendantes variables aléatoires normales centrées réduites [EL 13]. Pour ce faire, le vecteur aléatoire X est transformé en un vecteur aléatoire U , avec :

$$U_i = T(X_i) \quad (9)$$

Les variables aléatoires suivent une distribution normale centrée réduite et indépendamment de $i = j$, U_i et U_j sont mutuellement indépendants. Cette probabiliste transformation T nécessite de connaître les distributions statistiques de chacun des variables aléatoires. La fonction d'état limite devient après transformation :

$$H(U) = G[X(U)] \quad (10)$$

L'indice de fiabilité β_{HL} est défini comme la distance euclidienne de la origine de l'espace normal standard à la surface de l'état limite $H(u)=0$. u est une réalisation du vecteur aléatoire U , soit $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$. $H(u)$ est une réalisation de la variable aléatoire $H(u)$. Et pour trouver l'indice de fiabilité, il faut donc résoudre le problème de minimisation sous contrainte suivant :

$$\begin{cases} \beta_{HL} = \min \sqrt{\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{u}} \\ \mathbf{u} \in \mathbf{R}^m: \mathbf{H}(\mathbf{u}) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (11)$$

La solution de ce problème d'optimisation est l'indice de la fiabilité ciblée .

4. Simulation numérique

L'objectif de ce papier porte principalement sur l'étude fiabiliste de la pale de l'éoliennes en présence d'incertitude. Le manque de précision des paramètres, dans la conception des problèmes mécaniques, donne lieu à des résultats peu fiables. Par conséquent, la prise en compte des incertitudes des paramètres dans les calculs est cruciale pour garantir la fiabilité et la robustesse de la structure. Pour se faire on a développé un code MATLAB basé sur les deux méthodes de l'étude de la fiabilité FORM et SORM. Avant de passer à l'étude fiabiliste on a fait l'étude aérodynamique de la pale avec ANSYS CFX puis on a réalisé l'analyse modale en mode précontraint pour ressortir les fréquences propres de la pale. On peut résumer les étapes de calcul dans la figure ci-dessous.

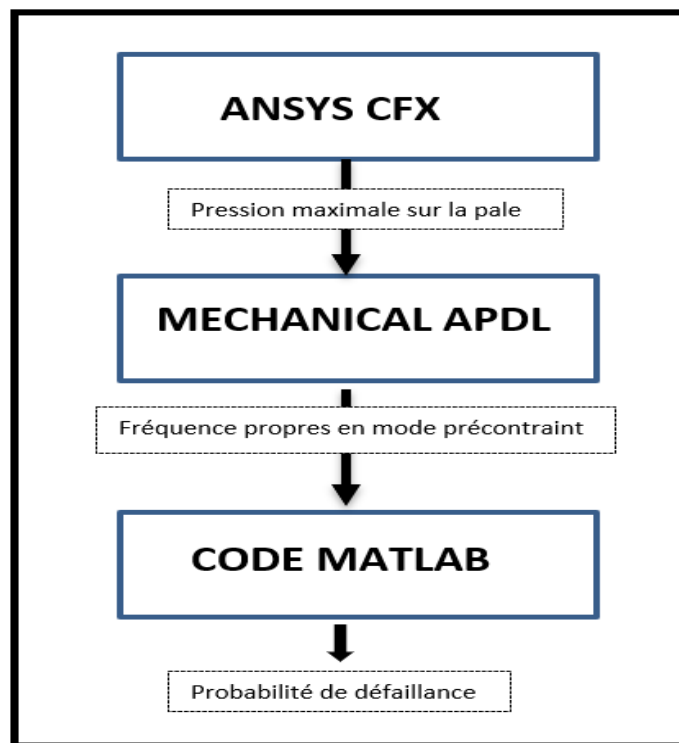


Figure 3. Organigramme de calcul

4.1. Approche par volumes finis

Pour concevoir et développer des éoliennes plus efficaces et plus fiables, le moyen de prévoir avec précision les caractéristiques aérodynamiques et la réponse de la structure sont d'une importance critique. Dans ces dernières années, le progrès dans le domaine de l'informatique a permis aux techniques de dynamique des fluides computationnelle (CFD) de traiter plus les problèmes aérodynamiques, comme la transition de couche limite, le décrochage dynamique, la turbulence d'entrée, les effets de rotation, etc. D'autre part, l'analyse CFD des éoliennes peut être effectuée à un coût moindre que celui nécessaire pour mettre en place une soufflerie et effectuer des expériences à grande échelle. Il y a eu une utilisation croissante de Codes CFD au cours de la dernière décennie pour l'analyse des performances des éoliennes, parmi lesquels le logiciel ANSYS CFX qui a une bonne réputation pour ses bonnes performances sur la simulation de turbomachines, ainsi que analyse d'aéroélasticité .

CFX utilise la méthode des volumes finis qui est l'une des techniques numériques utilisée par plusieurs codes CFD commerciaux pour résoudre les équations à dérivées partielles de Navier-stokes qui décrivent le mouvement des fluides. La méthode permet de traiter des géométries complexes avec des volumes de forme quelconque, ainsi qu'une application très naturelle des conditions aux limites.

La méthode des volumes finis exploite des approximations d'intégrales accompagnées du théorème de la divergence de Gauss, et elle se base directement sur la forme dite de l'équation à résoudre. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle.

Les équations de Navier-stokes ont une forme commune qui est mise sous la forme générale de l'équation de transport. Cette équation peut être écrite sous la forme :

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \text{div}(\rho \phi u) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \nabla \phi) + S^{\phi} \quad (12)$$

où

ϕ : indique le scalaire représentant les diverses propriétés ;

Γ_{ϕ} : est le coefficient de diffusion de ϕ

S^{ϕ} : le terme source associé à la variable ϕ

L'équation (12) représente de façon intrinsèque plusieurs équations de transport de variation dépendantes. De manière générale, chaque terme possède une interprétation physique bien définie. Si, par exemple $\phi = 1$ et $S^{\phi} = 0$, on retrouve l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (13)$$

De la même manière, on peut retrouver la plupart des équations gouvernant le transport d'une quantité. L'équation de transport généralisé est sous une forme divergente, ce qui permet l'utilisation du théorème de Gauss lors de la prise en compte des équations intégrales :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho \phi dV + \int_A n(\rho \phi u) dA = \int_A n(\Gamma_{\phi} \text{grad} \phi) dA + \int_{CV} S^{\phi} dV \quad (14)$$

L'étape fondamentale et primordiale de CFD divise le domaine de calcul (géométrie de la région d'intérêt) en nombre de plus petites régions appelées volumes de contrôle ou cellules et l'ensemble de ces cellules s'appelle une grille ou un maillage, en plus, les valeurs scalaires calculées sont stockées au centre des volumes de contrôle. CFX utilise la méthode des volumes finis pour convertir l'équation générale de transport en un système d'équations algébriques et il utilise différentes méthodes itératives pour résoudre le système algébriques résultant.

Les étapes clés pour trouver la solution de l'équation de transport d'une grandeur physique peuvent être résumées comme suit :

- Division de la géométrie en régions plus petites (volumes de contrôle) à l'aide d'un maillage informatique ;
- Intégration des équations sur chaque volume et application du théorème de la divergence de Gauss ;
- Incorporation des conditions aux limites ;
- Bilan de ϕ sur chaque volume ;
- Résolution du système algébrique résultant .

Dans ce papier, On modélise la pale de l'éolienne en utilisant des hypothèses de périodicité. Les conditions aux limites du domaine fluide sont les suivantes :

- Entrée : Vitesse de 25 m/s avec une intensité turbulente de 5%.
- Sortie : Pression de 1 atm
- Pale : Non-glissement
- Limites haut et bas : Périodique

Le modèle de turbulence utilisé pour cette étude est le modèle $k-\omega$ SST (transport sous contrainte de cisaillement). Ce modèle à deux équations développé par Menter [MEN 93], a l'avantage de pouvoir passer d'un modèle de turbulence $k-\epsilon$ [JON 72], adapté à la simulation d'écoulements de champ lointain, à un modèle à $k-\omega$ [WIL 08], adapté à la modélisation de la couche limite. Ce modèle a été largement utilisé dans des études sur les pales d'éoliennes avec des résultats favorables [SON 02, MO 02]. Les équations de transport pour le modèle SST utilisé pour calculer l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation spécifique ω peuvent être obtenues à partir de [MA 19] .

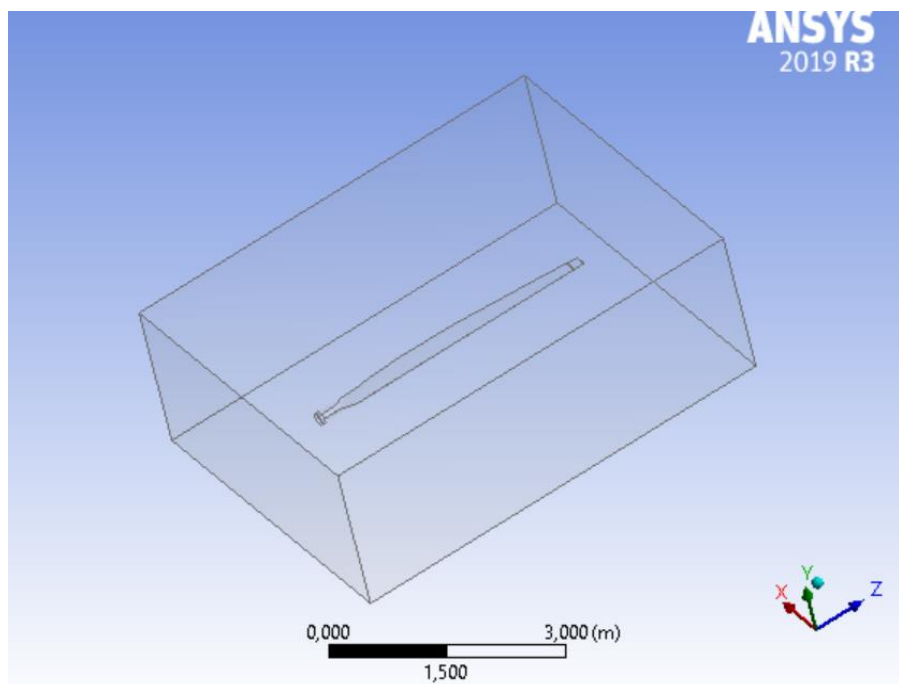


Figure 4. Géométrie sous CFX

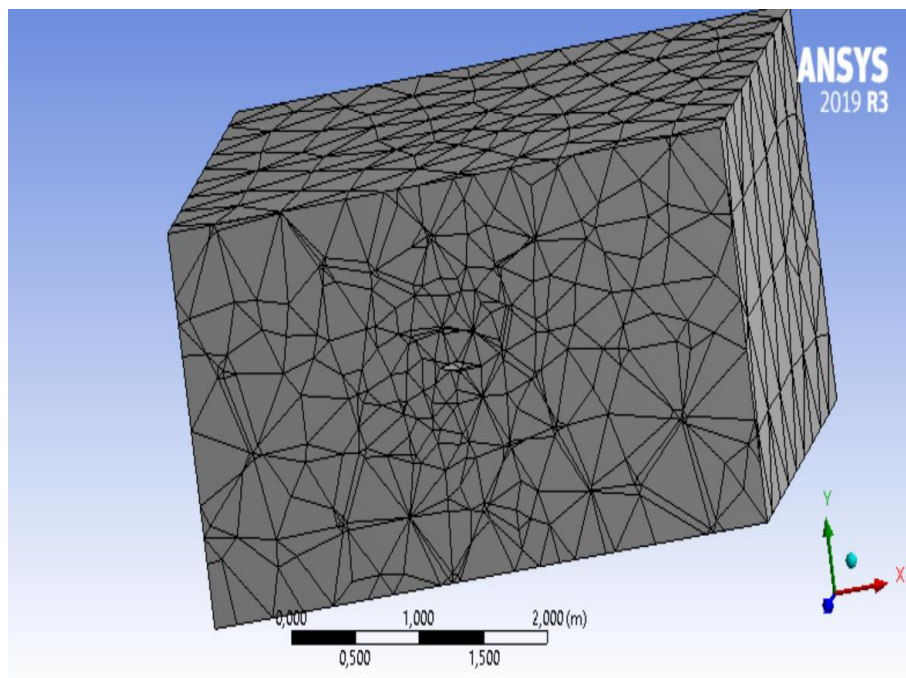


Figure 5. *Maillage sous CFX*

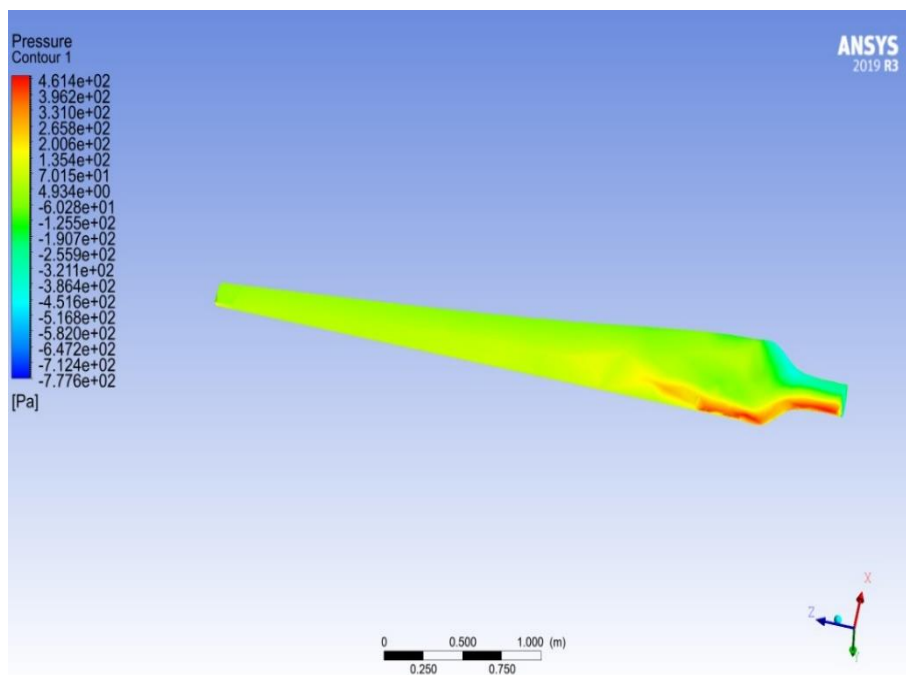


Figure 6. *Répartition de la pression sur la pale sous CFX*

4.2. Approximations en éléments finis

Comme pour la méthode des volumes finis, celle des éléments finis permet de fragmenter un problème continu complexe en une multitude de cellules simples dont le comportement physique est connu par des lois élémentaires. Elle permet de résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles et donc représenter la physique de plusieurs phénomènes. La physique présentée dans cette section est le comportement mécanique des solides.. La méthode des éléments finis (FEM) est une technique utilisée pour analyser le comportement des structures, elle est basée sur la division de la structure en un grand nombre d'éléments relativement petits. Chaque élément comprend un certain nombre de « nœuds ». Certains de ces nœuds peuvent être à l'intérieur de l'élément ; d'autres sont à la frontière. Les éléments n'interagissent qu'à travers les nœuds à la frontière. Chaque élément est caractérisé par un certain nombre de paramètres, tels que l'épaisseur, la densité, la raideur, le module

de cisaillement, etc. A chaque nœud sont également associés des déplacements ou degrés de liberté. Celles-ci peuvent inclure des translations, des rotations, des mouvements axiaux, etc. La méthode des éléments finis est le plus souvent utilisée pour étudier en détail des composants individuels au sein d'un système plus vaste.

En utilisant les forces aérodynamiques qui agissent sur les pales en régime stationnaire, calculées avec le logiciel ANSYS CFX, on a fait l'analyse des contraintes et déplacements générées dans les pales par ces forces aérodynamiques, avec le logiciel ANSYS Mechanical.

4.3. Interaction fluide-structure

Dans notre étude de cas, nous supposons que l'IFS est faible et nous procédons donc à un couplage unidirectionnel (Figure. 7). Nous choisissons la pression maximale des pales de 461,4 Pa avec la vitesse de vent maximale de fonctionnement des rotors, pour laquelle les charges sont les plus élevées. La figure 8 montre comment la pale est maintenue avec une extrémité fixée au corps et l'autre laissée libre. Avec ANSYS Mechanical, nous calculons les contraintes sur la pale et sa déformation. De plus, une analyse modale dans le modèle pré-contraint a été réalisée pour trouver leurs fréquences naturelles et ensuite procéder à l'étude de fiabilité.

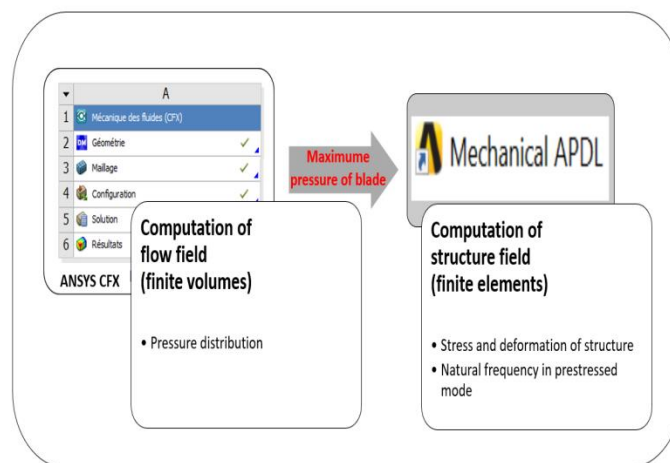


Figure 7. Procédure de couplage unidirectionnel

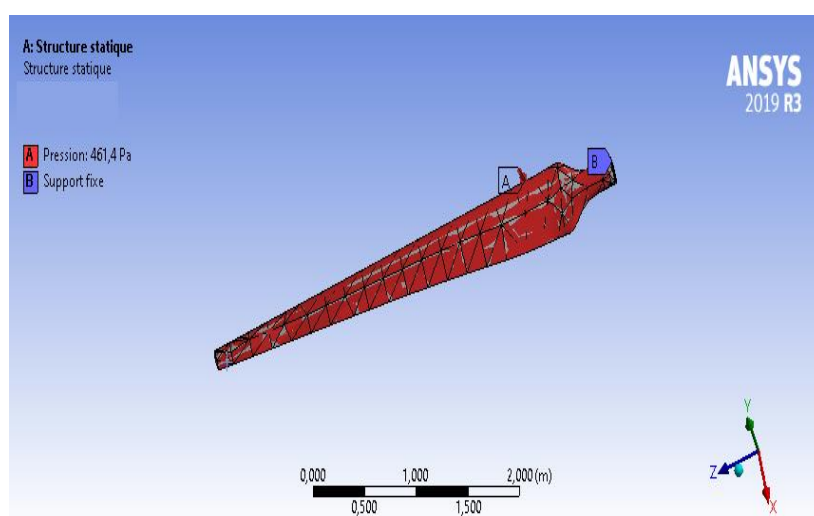


Figure 8. Paramètres d'analyse sur APDL mécanique : Application de la pression maximale et détermination de la face de fixation et maillage de la pale

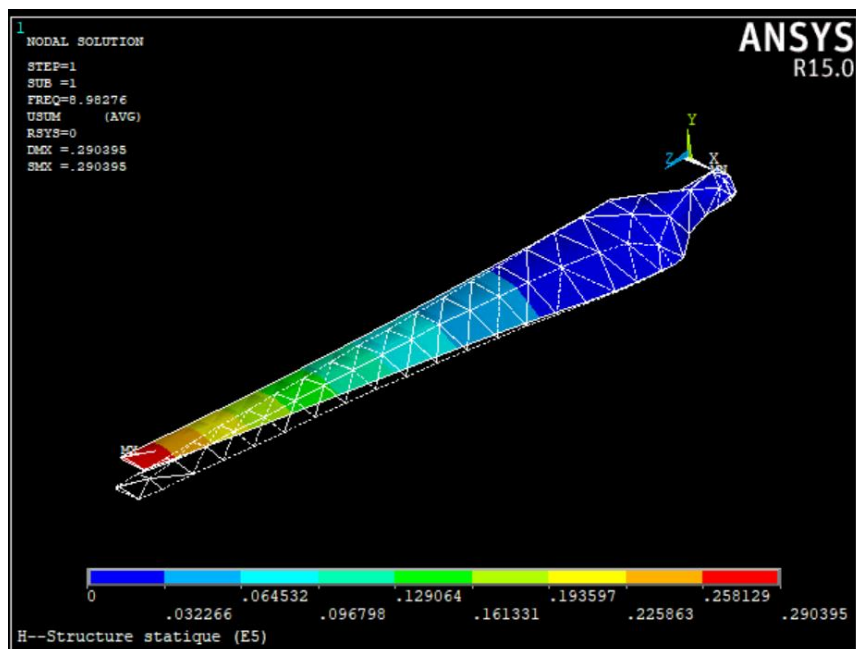


Figure 9. Contrainte de von Mises et déformation de la pale d'éolienne en mode précontraint

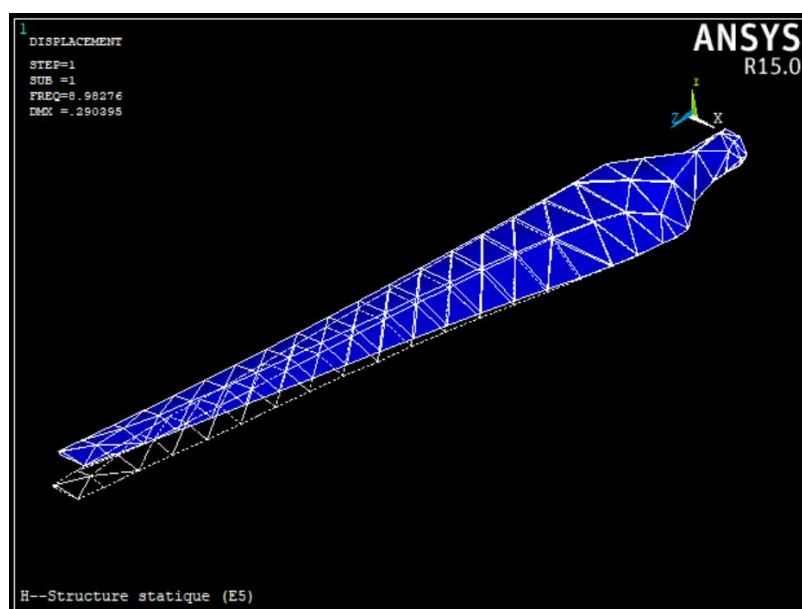


Figure 10. Première fréquence propre en mode précontraint

Mode	Frequency
F_1	8.9828
F_2	19.284
F_3	29.007
F_4	62.273
F_5	84.099

Tableau 1. Fréquences naturelles de la pale en mode précontraint

4.4. Analyse de fiabilité

Dans la présente étude numérique, les méthodes de fiabilité utilisées pour calculer la probabilité de défaillance sont les méthodes FORM et SORM, prenant en compte les incertitudes associées aux propriétés de la structure. Le calcul de la fonction d'état limite implicite G qui est défini en fonction de la fréquence propre F_1 du système couplé et limitée par F_0 tel que :

$$G(E, \rho) = F_1 - F_0 \text{ avec } F_0 = 8.38 \text{ Hz}$$

Les tableaux 2 et 3 présentent les paramètres de conception et leurs lois de distribution et les résultats obtenus par les méthodes FORM et SORM.

Paramètres	Moyenne	Ecart-type	Distribution
Module de Young (Pa)	$6.9.10^{10}$	$0.35.10^{10}$	Normal
P (kg/m ³)	2710	83	Normal

Tableau 2. Les paramètres de conception et leurs lois de distribution

Paramètres	FORM	SORM
Module de Young	$6.1985.10^{10}$	$6.1985.10^{10}$
ρ (kg/m ³)	$2.7974.10^3$	$2.7974.10^3$
Indice de fiabilité β	2.2643	2.2599
Probabilité P_f %	1.18	1.19
Fiabilité %	98.82	98.81

Tableau 3. Les résultats obtenus par les méthodes FORM et SORM

Des différences mineures entre le premier et le second ordre approximations pour déterminer la fiabilité l'indice β et la probabilité de défaillance P_f sont visibles lorsqu'on compare les résultats des deux méthodes. En raison de l'utilisation de la dérivée du second ordre, SORM est souvent plus précis que FORM mais prend plus de temps de calcul.

5. Conclusion

Dans cette étude, un modèle IFS pour des pales d'éoliennes à axe horizontal a été établi en utilisant des volumes finis pour étudier le comportement des fluides et la méthode des éléments finis

pour étudier le comportement des solides et effectuer l'analyse modale en mode précontraint, ce qui nous a conduit à l'étude de la fiabilité de la pale en tenant compte des incertitudes liées aux matériaux. La stratégie de couplage utilisée est basée sur un couplage unidirectionnel, et en guise de travail en perspective, nous étudierons le couplage fort entre le fluide et la structure. couplage fort entre fluide et structure.

Bibliographie

- [LU 09] X. Lu, M. B. McElroy, J. Kiviluoma, Global potential for wind-generated electricity, Proc. Natl. Acad. Sci. United States, Vol. 106, pp. 10933–10938, Oxford, CO, July 2009.
- [SM 21] J. Smily, B. Radi, Probabilistic Study of S809 Airfoil for Wind Turbine Blade, Advances in Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 13(Issue 1):1-9, 2021.
- [MA 15] R. El Maani, B. Radi, and A. El Hami, Comparison of the FE/FE and FV/FE Treatment of Fluid-Structure Interaction, Int. Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 5(Issue 4):59-69, April 2015.
- [EL 13] A. El Hami, B. Radi, Incertitudes, Optimisation et Fiabilité des structures (Lavoisier, 2013).
- [WU 07] R. Wuchner, A. Kupzok, K.U. Bletzinger, A Framework for Stabilized Partitioned Analysis of Thin Membrane-wind Interaction, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 54(Issue 6-8):945-963, 2007.
- [MEN 93] F. R. Menter, Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows, AIAA 23rd Fluid Dynamics Conference, pp. 2906, Orlando, FL, U.S.A, July 1993.
- [JON 72] W. Jones, B. Launder, The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15(Issue 2):301-314, February 1972.
- [WIL 08] D. C. Wilcox, Formulation of the $k-\omega$ Turbulence Model Revisited, AIAA 45th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Vol. 46, pp. 2823-2838, California, November 2008.
- [SOR 02] N. N. Sorensen, J. A. Michelsen, and S. Schreck, Navier–Stokes Predictions of the NREL Phase VI Rotor in the NASA Ames 80 ft× 120 ft Wind Tunnel, Wind Energy, Vol. 5(Issue 2-3):151-169, January 2002.
- [MO 02] J.O. Mo, Y.H. Lee, CFD Investigation on the Aerodynamic Characteristics of a Small- sized Wind Turbine of NREL PHASE VI Operating with a Stall-regulated Method, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 26:81-92, January 2002.