

Simulation numérique de l'écoulement autour d'une éolienne à axe horizontal

Numerical simulation of the flow around a horizontal axis wind turbine

R. El Maani¹, B. Radi², A. El Hami³

¹ LSMI, ENSAM Meknès, Marjane 2, Meknès, Morocco, elmaani.rabi3@gmail.com

² LIMII, FST Settati, Maroc, bouchaib.radi@yahoo.fr

³ LMN, INSA de Rouen, France, abdelkhalak.elhami@insa-rouen.fr

RÉSUMÉ. L'éolienne à axe horizontal (HAWT) est l'une des architectures les plus diffusées parmi les systèmes traditionnels de conversion d'énergie éolienne, en raison de sa grande efficacité aérodynamique. Plusieurs travaux sur les éoliennes portent sur les différents aspects de la dynamique des fluides de la pale du rotor, afin d'améliorer son efficacité et, par conséquent, la production globale d'énergie. Dans cet article, une simulation numérique a été réalisée en tenant compte de la déformation due à la charge aérodynamique d'une pale d'éolienne en effectuant une analyse d'Interaction Fluide-Structure (IFS) en régime permanent en développant une charge aérodynamique sur cette pale sous ANSYS/Fluent. Ensuite, les pressions sur les interfaces de la pale sont transmises sous forme de charges de pression à ANSYS/Mechanical pour déterminer les contraintes et déformations de la pale. La pale mesure 43,2 m de long et commence avec une forme cylindrique à la racine, puis passe aux profils S818, S825 et S826 pour la racine, le corps et la pointe, respectivement. Cette pale a également un pas variable en fonction du rayon, ce qui lui donne ainsi une torsion et l'angle de pas à l'extrémité de la pale est de 4°. La pale est faite d'un matériau composite orthotrope, elle a une épaisseur variable et possède également un longeron à l'intérieur pour la rigidité structurelle. Le vent turbulent s'écoule à 12 m/s, ce qui est une vitesse de vent nominale typique pour une éolienne de cette taille. Ce flux entrant est supposé faire tourner la pale à une vitesse angulaire de -2,22 rad/s autour de l'axe z. L'écoulement sera simulé autour d'une seule pale et la solution sera extrapolée aux deux autres pales afin de visualiser les résultats pour un rotor à 3 pales.

MOTS-CLÉS. Énergie éolienne, Analyse CFD, Éolienne à axe horizontal, Simulation numérique.

1. Introduction

L'éolienne à axe horizontal (HAWT) représente l'architecture la plus courante parmi les systèmes de conversion d'énergie éolienne existants, avec des milliers de MWs de nouvelle capacité installée chaque année dans le monde. Son processus de conception, largement accepté par les fabricants ainsi que par les institutions académiques, est généralement séparé en deux étapes consécutives [1] :

- La géométrie externe de la pale (en termes de distribution de la corde et de l'angle de torsion le long de la portée de la pale, de la taille du rotor et d'autres facteurs, souvent empiriques, liés au coût de l'énergie) est d'abord déterminée en utilisant un algorithme basé sur la «BEM» (Blade Element Momentum).
- Une disposition correcte de l'enveloppe de la pale et des renforts est déterminée au moyen d'une analyse structurale basée sur la méthode des éléments finis (MEF), en tenant compte à la fois des charges aérodynamiques et inertielles agissant sur la pale.

Ces deux étapes ont été largement étudiées par plusieurs auteurs. Liu et Janajreh [2] ont proposé un modèle BEM amélioré pour l'analyse de la performance de l'HAWT, en tenant compte à la fois de l'effet de perte de pointe et de l'effet de rotation, afin d'étendre son application au régime de sillage turbulent. Refan et Hangan [3] ont étudié la performance aérodynamique d'un HAWT tripale de 2.2 m de diamètre afin d'évaluer l'applicabilité de la théorie BEM pour la modélisation des rotors à petite échelle. ElQuatary et Elhadidi [4] ont comparé les simulations BEM et CFD (Computational

Fluid Dynamics) pour deux HAWT caractérisées par Différentes épaisseurs de pales, ce qui permet d'obtenir un accord marqué, en particulier pour la configuration de pales plus épaisses. Kong et al [5] ont proposé une conception structurelle d'une pale composite HAWT de taille moyenne en verre E-glass/Epoxy. Plusieurs cas de charges nominales (telles que les forces aérodynamiques, celles dues à l'accumulation de glace, les charges hygrothermiques et mécaniques) ont été pris en compte et les paramètres de conception les plus importants ont été inclus dans une analyse FEM, estimant également la résistance à la fatigue de la pale. Parmi les méthodes d'optimisation numérique, une pertinence particulière est aujourd'hui assumée par les algorithmes évolutifs, dont les solutions sont générées à partir de techniques inspirées de l'évolution naturelle. Comme observé par Mendez et Greiner [24], les algorithmes génétiques sont des optimiseurs globaux qui ont un large compromis entre l'exploration et l'exploitation du problème spatial : parmi leurs avantages, une capacité de recherche globale doit être reconnue, grâce à la gestion d'une population de solutions candidates plutôt qu'une seule.

Plusieurs outils pour l'optimisation multidisciplinaire des éoliennes ont été proposés dans la littérature ouverte au cours des dernières années ; Pourrajabian et al [12] ont proposé une procédure pour la conception aérostructurale d'une pale de petite éolienne basée sur un code BEM et sur un modèle structurel simple. Bottaso et al [13] ont décrit une procédure d'optimisation multidisciplinaire d'éoliennes à l'aide d'un modèle aero-servo-élastique paramétrique de haute-fidélité, considérant la production annuelle d'énergie et le poids de la pale comme fonctions de coût. Ashuri et al [14] ont également mis au point une optimisation multidisciplinaire pour la conception des éoliennes offshore ; les fonctions objectives considérées sont représentées par le coût nivelé de l'énergie et comprennent les contraintes de conception comme les contraintes, les fréquences modales de déflexion et les limites de fatigue. Grujicic et al [15] ont proposé une procédure multidisciplinaire d'optimisation de la conception pour l'élaboration d'une disposition composite rentable d'un HAWT en utilisant le coût de l'énergie (COE) comme fonction de condition physique unique. Dans les outils cités, la conception multi-objectifs n'est pas formulée comme un problème optimal de Pareto mais en utilisant un coût combiné (PEA divisé par le poids total), un coût nivelé de l'énergie ou le coût de l'énergie seulement.

Même si plusieurs auteurs ont largement proposé des optimisations aérodynamiques et structurales des pales HAWT, en passant par la littérature, le potentiel d'un algorithme évolutif basé sur le couplage d'un modèle aérodynamique (basé sur la théorie BEM) et d'un modèle structurel (basé sur une analyse MEF) a été rarement étudié ; Zhu et coll. [16] propose une optimisation intégrée aérodynamique et structurale pour la conception des pales HAWT. Wang et al [17] ont développé une méthode d'optimisation intégrée aérodynamique et structurale pour une pale d'éolienne composite, basée sur l'optimisation multidisciplinaire de la conception (MDO).

Dans cet article, seule une analyse d'IFS en régime permanent sera effectuée sur la base d'un couplage unidirectionnel de l'écoulement autour d'une éolienne à axe horizontal utilisant ANSYS/Fluent pour développer la charge aérodynamique sur la pale, et les pressions sur les zones en contact de la pale sont transmises sous forme de charges de pression à ANSYS/Mechanical pour déterminer les contraintes et déformations. Les résultats numériques seront ensuite présentés et comparés aux résultats des calculs manuels.

2. Formulation mathématique

2.1. Équations directrices

Les équations directrices sont les équations de continuité et de Navier-Stokes. Ces équations sont écrites dans un cadre de référence tournant avec la pale. Ceci a l'avantage de rendre notre simulation sans avoir besoin d'un maillage mobile pour tenir compte de la rotation de la pale.

Les équations utilisées sont les suivantes :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v}_r = 0$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}_r) + \rho (2\vec{\omega} \times \vec{v}_r + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_r$$

Où \vec{v}_r est la vitesse relative (la vitesse vue depuis le cadre mobile), $\vec{\omega}$ est la vitesse angulaire et les termes additionnels dans les équations de Navier-Stokes sont la force de Coriolis ($2\vec{\omega} \times \vec{v}_r$) et l'accélération centripète ($\vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}$).

2.2. Calcul manuel des résultats attendus

- Un simple calcul manuel qui peut être fait avant de commencer la simulation est de trouver la vitesse théorique du vent à l'extrémité. On peut ensuite comparer le résultat avec celui obtenu après simulation numérique.

La vitesse, v , sur la pale doit suivre la formule $v = r \times \omega$. En branchant notre vitesse angulaire de -2.22 rad/s et en utilisant la longueur de la pale de 43.2 m plus 1 m pour tenir compte de la distance de la racine au moyeu, on obtient :

$$v = -2.22 \text{ rad/s} \times -44.2 \text{ m}$$

$$v = 98.12 \text{ m/s}$$

- La force radiale est la force vers l'extérieur qui provient d'une masse en rotation. Elle est égale et opposée à la force de réaction à la racine de la pale qui maintient la pale connectée au moyeu. On peut aussi la considérer comme la masse multipliée par l'accélération radiale.

L'accélération radiale est égale à $a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2$; $\ddot{r} = 0$ car le rayon est constant (c'est-à-dire que la pale est fixée dans le sens radial). La force radiale est simplement égale à $F_r = -ma_r$, et en substituant l'accélération radiale et en exprimant la vitesse angulaire comme ω on obtient :

$F_r = -mr\omega^2$. Dans cette expression, m représente la masse totale de la pale et r la distance dans la direction radiale où réside cette masse. Dans ce cas, r sera l'emplacement du centre de masse de la pale dans le sens radial.

3. Couplage IFS unidirectionnel

En général, on peut choisir de décrire l'ensemble du système couplé de manière monolithique et résoudre tous les champs ensemble ou séparer les champs et les coupler dans le sens d'une analyse partitionnée [31]. Dans ce dernier cas, des algorithmes séquentiels ou itératifs peuvent être utilisés. L'approche monolithique est simple et permet de résoudre le système d'équations résultant avec une matrice de rigidité tangente complète, le fluide, la structure et les degrés de liberté du maillage sont inclus [31]. Cependant, de telles approches monolithiques présentent un certain nombre d'inconvénients évidents tels que la perte de modularité des logiciels et les limitations liées à l'application de différents solveurs sophistiqués dans les différents domaines. C'est pourquoi on considère généralement qu'ils ne sont pas très bien adaptés à une application à des problèmes réels, où souvent non seulement des approches de solutions spécifiques, mais aussi des codes spécifiques

doivent être utilisés dans les différents domaines. Pour cette raison et pour un certain nombre d'autres raisons, on préfère utiliser une approche partitionnée.

La méthode de couplage utilisée dans cet article pour la modélisation IFS est basée sur le couplage unidirectionnel. Le champ de fluide est résolu par CFD jusqu'à ce que les critères de convergence soient atteints. Les pressions aérodynamiques sur la pale obtenues par modélisation CFD sont ensuite mappées sur le modèle EF en tant que conditions limites de charge. Ensuite, le modèle EF est utilisé pour calculer les réponses structurales de la pale (telles que la déformation et la répartition des contraintes) soumises à des charges aérodynamiques, de gravité et centrifuges. Le schéma de la modélisation de l'IFS à sens unique est présenté à la figure 1.

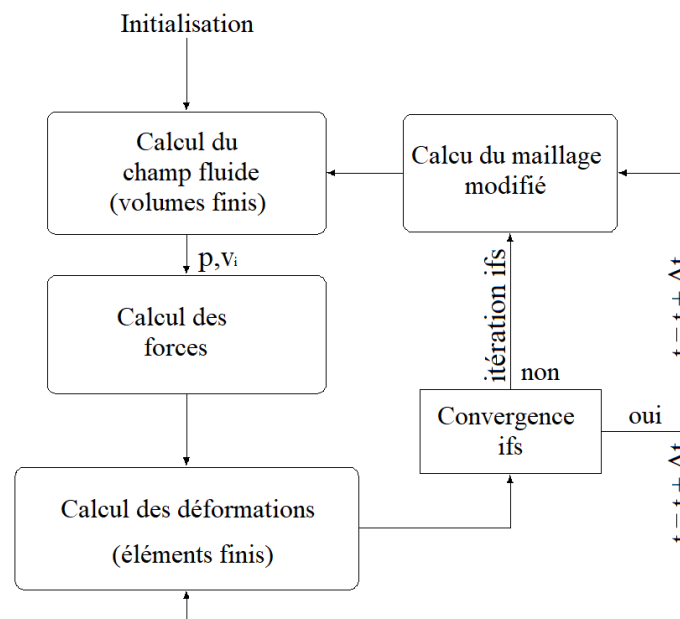


Figure 1. Procédure de solution couplée

4. Simulation numérique

4.1. Modèle pale d'éolienne

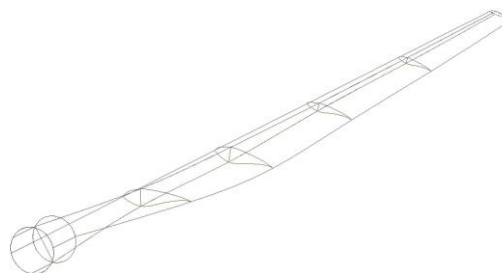


Figure 2. Modèle géométrique 3D de la pale d'éolienne

Le modèle d'éolienne utilisé dans cette étude est l'éolienne WindPACT de 1,5 MW [21, 22, 23], qui est une éolienne de référence conçue par le NREL (National Renewable Energy Laboratory) dans le cadre du projet WindPACT (Wind Partnership for Advanced Component Technologies) entre 2000 et 2002. Cette éolienne est une éolienne conventionnelle à trois pales au vent, à axe horizontal et à pas variable, à vitesse variable. Les détails de l'éolienne WindPACT 1.5MW se trouvent dans les Références. [21, 22, 23], et ses principaux paramètres sont résumés dans le tableau

1. La pale commence avec une forme cylindrique à la racine et passe ensuite aux profils S818, S825 et S826 pour la racine, le corps et la pointe, respectivement. La géométrie 3D modélisée de la pale est présentée sur la figure 2.

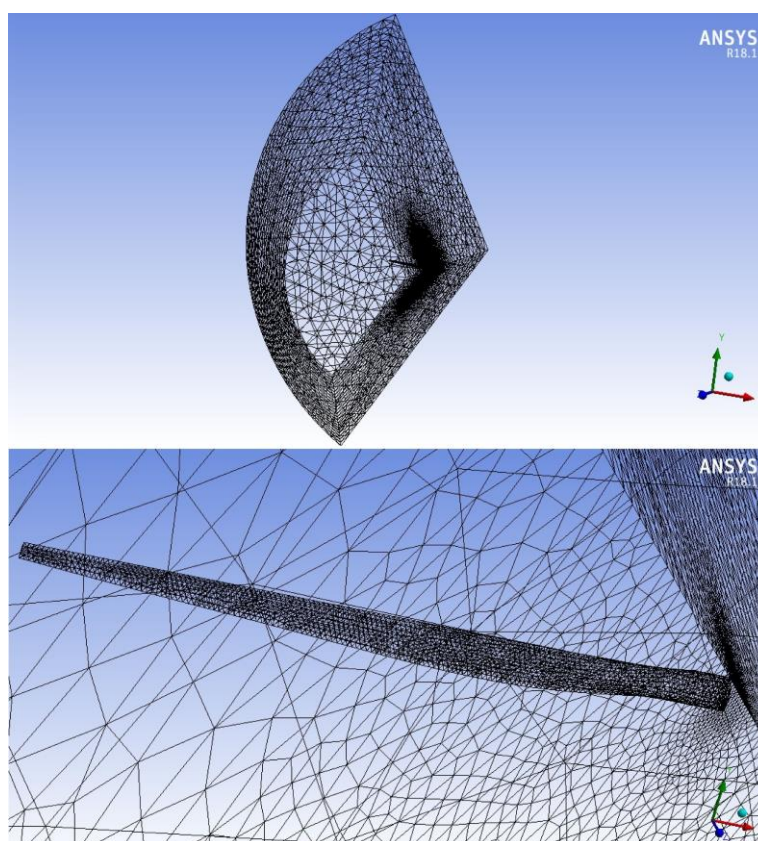


Figure 3. Maillage fluide

Paramètres	Valeurs	Unités
Puissance nominale P_{nom}	1.5	MW
Nombre de pales N_p	3	-
Diamètre du rotor D	82.5	m
Vitesse nominale du vent V_{nom}	12	m/s

Tableau 1. Paramètres de l'éolienne WindPACT 1.5MW

Un modèle CFD de pales d'éoliennes est établi à l'aide d'ANSYS/Fluent, qui est un logiciel de simulation largement utilisé. Le domaine de calcul, le maillage, le modèle de turbulence, la méthode de résolution et les critères de convergence utilisés dans la modélisation CFD sont présentés dans cette section. Le domaine de calcul est maillé avec un maillage non structuré généré avec 356 780 cellules et 71 627 points nœuds de volume, comme le montre la Figure 3. Il contient également des mélanges de maille tétraédriques et de prismes. Il a l'orthogonalité minimale supérieure à 0.15 et l'asymétrie maximale inférieure à 0.95, qui sont généralement des conditions de maillage conseillés pour conduire à des résultats de simulation corrects.

La structure de la pale est maillée à l'aide d'un maillage structuré, comme le montre la figure 4, avec un nombre total de 4059 éléments et 3903 points nœuds de volume. Le type d'élément utilisé

pour la dynamique des solides (CSD) est SOLID186 (élément de brique à vingt nœuds avec intégration réduite), utilisé uniquement pour les éléments hexaédriques. Le maillage CSD est comparativement plus grossier que le maillage volumique CFD.

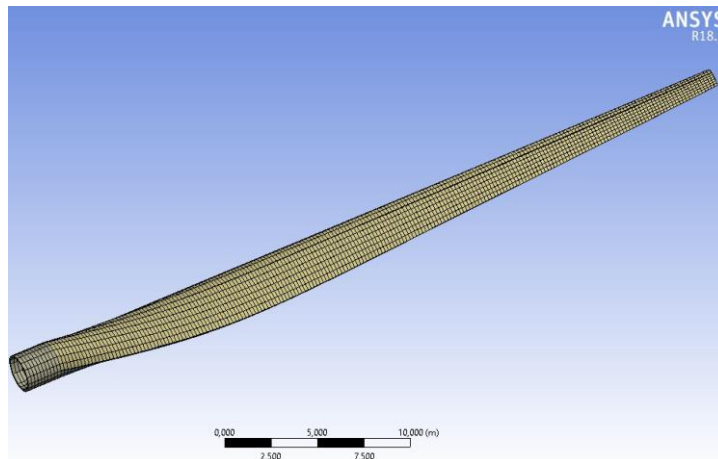


Figure 4. *Maillage structure*

4.2. Modélisation CFD

4.2.1. Conditions aux limites

On modélise seulement 1/3 du domaine complet en utilisant des hypothèses de périodicité :

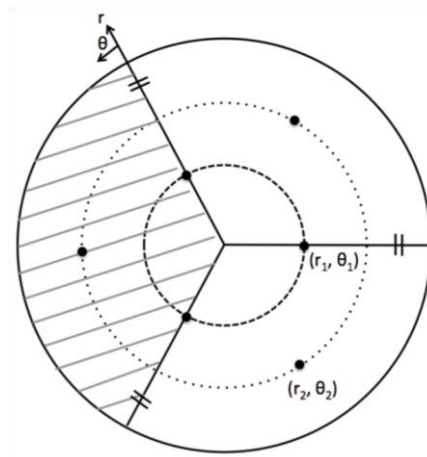


Figure 5. *Conditions aux limites*

Ceci prouve donc que la distribution de vitesse pour θ de 0 à 120 degrés est la même. Si l'on désigne θ_1 comme représentant l'une des limites périodiques du domaine 1/3 et θ_2 comme l'autre limite, alors $\vec{v}(r_i, \theta_1) = \vec{v}(r_i, \theta_2)$.

Les conditions aux limites du domaine fluide sont les suivantes :

- Entrée : Vitesse de 12 m/s avec une intensité turbulente de 5% et un rapport de viscosité turbulent de 10.
- Sortie : Pression de 1 atm
- Pale: Non-glissement

– Limites latérales : Périodique

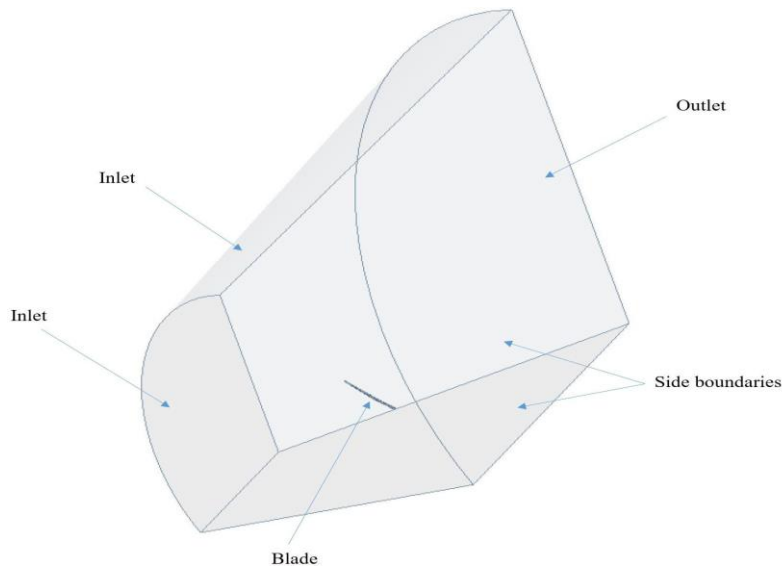


Figure 6. Conditions aux limites

4.2.2. Turbulence

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 [24], a l'avantage de pouvoir passer d'un modèle de turbulence $k-\epsilon$ [25], adapté à la simulation d'écoulements de champ lointain, à un modèle à $k-\omega$ [26], 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 [27, 28]. 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 [30].

4.2.3. Méthode de résolution

Comme le problème se situe dans la région subsonique et bien en dessous de 0.3 Mach, l'air peut être considéré comme incompressible [29]. De ce fait, la densité du fluide est à peu près constante et a été estimée à 1.225 kg/m^3 . La viscosité est également considérée comme constante à $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$. Les équations RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) incompressibles sont résolues à l'aide de l'algorithme couplé basé sur la pression, qui résout les équations du moment et de continuité basées sur la pression d'une manière étroitement liée. Comparé à l'algorithme de ségrégation basé sur la pression, dans lequel les équations du moment et de continuité basées sur la pression sont résolues séparément, l'algorithme couplé basé sur la pression améliore considérablement le taux de convergence [30].

4.3. Modélisation structurelle

La géométrie de la pale d'éolienne est créée à partir des informations de forme aérodynamique (corde, angle de torsion et forme en coupe) données dans [21, 22, 23]. La pale commence par une forme cylindrique à l'emplanture et passe ensuite aux profils S818, S825 et S826 pour l'emplanture, le corps et l'extrémité, respectivement, elle a aussi un longeron à l'intérieur de la pale pour la rigidité structurelle. La géométrie de la pale créée a été divisée de façon à ce qu'on puisse appliquer différentes charges à différentes sections de la pale. Il a été décidé de diviser la pale en 5 segments égaux dans le sens de l'envergure. La longueur de la pale complète est de 41.25 m plus 2 m pour la

racine cylindrique, donc la longueur de chacun des cinq segments était de 8.25 m. Cette pale a également un pas qui varie en fonction du rayon, ce qui lui donne une torsion et l'angle de pas au bout de la pale est de 4 degrés. La géométrie de la pale créée est illustrée à la figure 7.

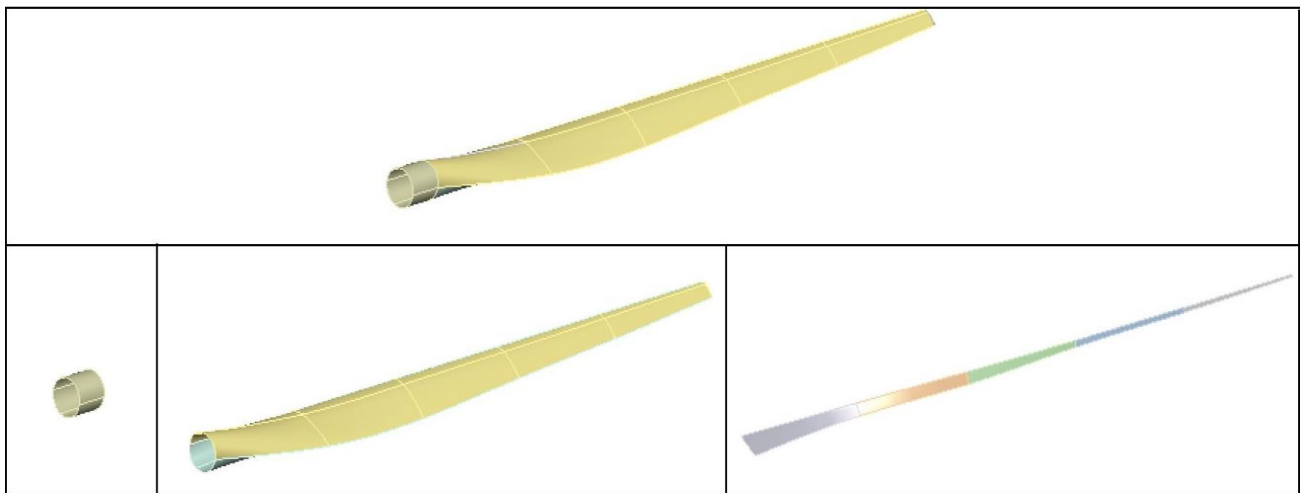


Figure 7. Schéma de la structure des pales

L'épaisseur de la surface extérieure diminue linéairement de 0.1 m à la racine jusqu'à 0.005 m à l'extrémité. Le longeron a un comportement d'épaisseur similaire avec 0.1 m à son point le plus proche de la racine et 0.03 m à l'extrémité. En résumé, voici les spécifications d'épaisseur nécessaires ainsi que leur localisation par rapport au système global de coordonnées (qui représente le centre d'un moyeu imaginaire et donc le centre de rotation).

	X (m)	Thickness (m)
Surface	-1	0.1
	-44.2	0.005
Spar	-3	0.1
	-44.2	0.03

Tableau 2. Epaisseur de la pale

Les pales d'éoliennes sont maintenant faites de matériaux composites pour réduire leurs poids. On simplifie ici l'analyse structurale en supposant que le matériau composite peut être approximé par les propriétés orthotropes suivantes du matériau.

Densité (kg/m ³)	1550
Module d'Young-X (Pa)	1.1375E11
Module d'Young-Y (Pa)	7.583E09
Module d'Young-Z (Pa)	7.583E09
Coefficient de Poisson-XY	0.32
Coefficient de Poisson-YZ	0.37
Coefficient de Poisson-XZ	0.35
Module de cisaillement-XY (Pa)	5.446E09
Module de cisaillement-YZ (Pa)	2.964E09
Module de cisaillement-XZ (Pa)	2.964E09

Tableau 3. *Propriétés du matériau*

- Conditions aux limites

Outre les charges aérodynamiques, il existe deux autres sources importantes de charges sur les pales, à savoir les charges gravitationnelles, qui sont introduites par la gravité agissant sur les pales, et les charges centrifuges, qui sont dues à la rotation des pales. Dans cette étude, la vitesse de rotation du rotor est appliquée à la structure de la pale pour tenir compte des charges centrifuges, et les charges gravitationnelles sont également appliquées à la structure de la pale comme charge statique. De plus, une condition limite fixe est appliquée à l'emplanture de la pale.

5. Résultats et discussions

La figure 8 représente le débit massique calculé entre les sélections nommées, les entrées et les sorties, et nous pouvons voir que la masse est équilibrée, ce qui est une bonne indication que notre modèle est bon.

Mass Flow Rate	(kg/s)
inlet	221221.15
inlet-top	664988.49
outlet	-886210
Net	-0.3607683

Figure 8. *Débit massique*

Le premier résultat qu'on va examiner est la vitesse de la pale. Comme prévu, la vitesse locale de la pale augmente avec le rayon. La vitesse à l'extrémité, qui est la vitesse la plus élevée, peut alors être comparée aux calculs manuels dans la section 2.2. Et donc la vitesse maximale serait juste ici, à environ 98 m/s. Les figures ci-dessous présentent la vitesse de la pale, l'écoulement autour de l'éolienne à l'aide des lignes de vitesse et les contours de pression à la surface de la pale.

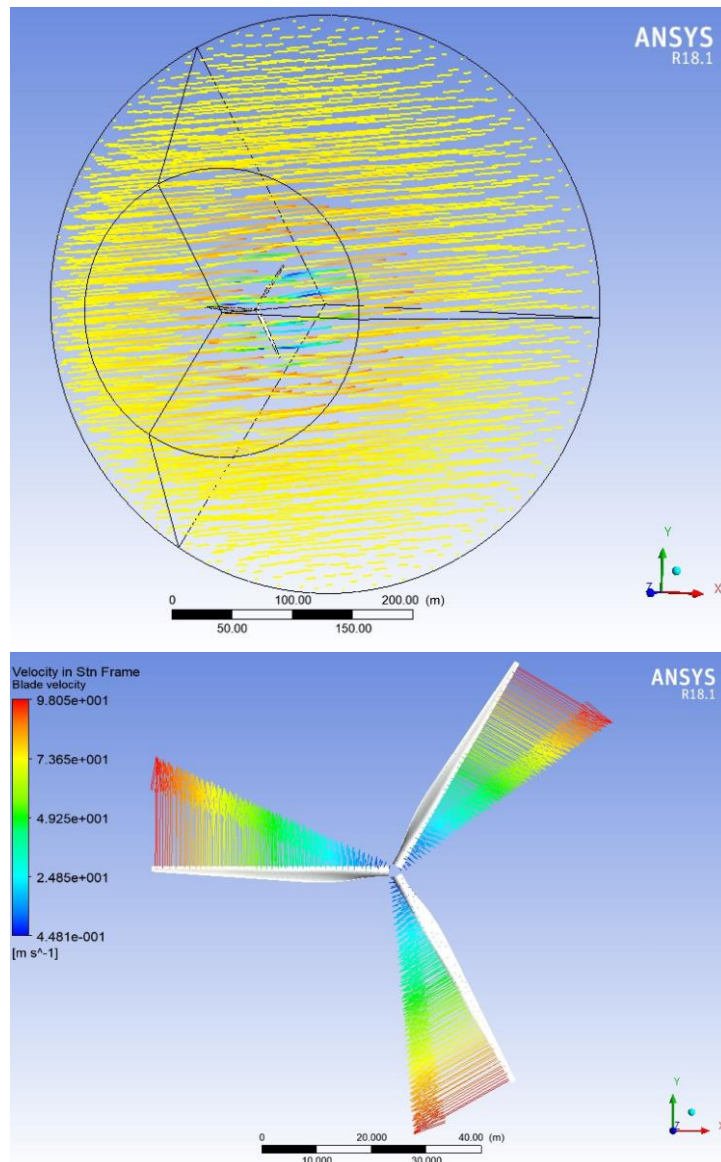


Figure 9. Vecteurs vitesses de la pale

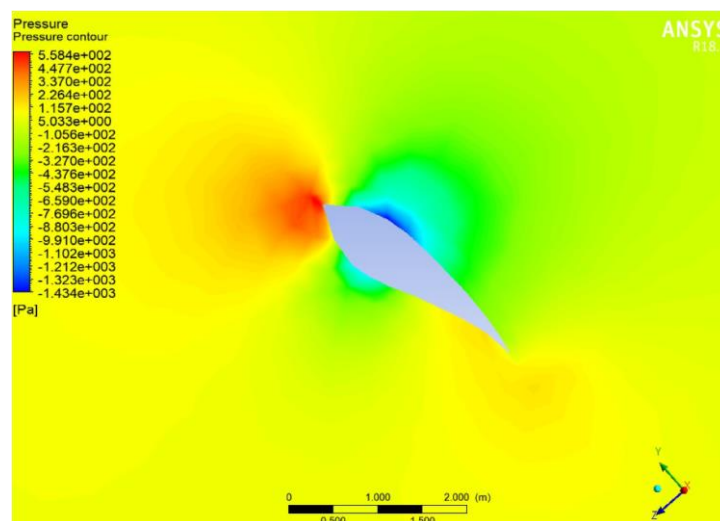


Figure 10. Contours de pression

5.1. Résultats de l'IFS

Cette section examine la déformation due à la charge aérodynamique d'une pale d'éolienne en effectuant une analyse d'IFS unidirectionnelle en régime permanent. ANSYS/Fluent a développé la charge aérodynamique sur la pale et les pressions sur les zones en contact de la pale sont transmises sous forme de charges de pression (Figure 11) à ANSYS/Mechanical pour déterminer les contraintes et déformations sur la pale.

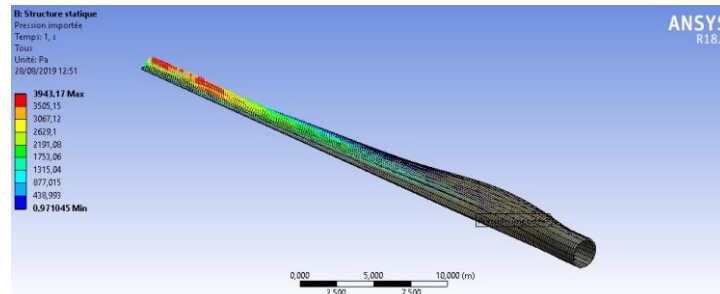


Figure 11. Charge de pression importée

En extrayant la masse et le centre de masse de la pale, on peut maintenant fournir les résultats du calcul fait dans la section 2.2. La pale pèse 22 473 kg et son centre de masse (X, Y, Z) est situé aux coordonnées (-14.232 m, -0.213 m, 0.160 m). La pale est orientée de manière à ce que l'axe des X pointe dans la direction radiale de la pale. En introduisant les valeurs correspondantes dans la formule de la force radiale, on obtient :

$$F_r = -mr\omega^2$$

$$F_r = -22\,473\text{ kg}(-14.232\text{ m})(-2.22\text{ rad/s})^2$$

$$F_r = 1576.3\text{ kN}$$

Un bon accord est observé en comparant les résultats numériques de la force radiale de la racine présentés à la figure 12 avec le calcul manuel.

Résultats	
<input type="checkbox"/> Axe X	1,5781e+006 N
<input type="checkbox"/> Axe Y	15312 N
<input type="checkbox"/> Axe Z	71981 N
<input type="checkbox"/> Total	1,5798e+006 N

Figure 12. Force radiale de la racine

Le déplacement calculé de l'aile avec la pale déformée et non déformée est illustré à la Figure 13. On peut clairement voir que la pression du fluide calculée a été transférée avec succès pour déformer le maillage volumique du CSD.

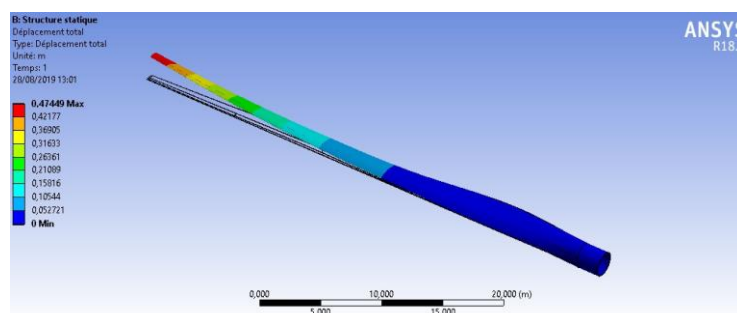


Figure 13. Déformations totales de la pale

6. Conclusion

Dans cette étude, un modèle d'IFS (Interaction Fluide Structure) pour les pales d'éoliennes à axe horizontal a été établi en couplant un modèle CFD (Computational Fluid Dynamics) et un modèle CSD (Computational Solid Dynamics). La stratégie de couplage est basée sur un couplage unidirectionnel, dans lequel les charges aérodynamiques calculées par modélisation CFD sont mappées sur la modélisation EF en tant que conditions aux limites de charge. Les simulations calculées ont été validées par une série de calculs manuels des résultats escomptés, et les distributions de pression, de déflexion et de contrainte des pales ont été présentées.

Bibliographie

- [1] Burton T., Jenkins N., Sharpe D., Bossanyi E., *Wind energy handbook*, John Wiley & Sons; 2001.
- [2] Liu S., Janajreh I., *Development and application of an improved blade element momentum method model on horizontal axis wind turbines*, Int J Energy Environ Eng, 2012.
- [3] Refan M., Hangang H., *Aerodynamic performance of a small horizontal axis wind turbine*, J Sol Energy Eng, 134(2), 2012.
- [4] ElQatary I., Elhadidi B., *Comparison of CFD with BEM technique for wind turbine simulation of thin and thick rotor blades*, In : 31st AIAA applied aerodynamics conference, San Diego, CA, June 24-27, 2013.
- [5] Kong C., Bang J., Sugiyama Y., *Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life*, Energy August September, 30(11-12), 2101-14, 2005.
- [6] Mendez J., Greiner D., *Wind blade chord and twist angle optimization using genetic algorithms*, In : Proceedings of the fifth international conference on engineering computational technology, Stirlingshire, UK : Civil-Comp Press, 2006.
- [7] Winter G., Periaux J., Galan M., Cuesta P., *Genetic algorithms in engineering and computer science*, Jhon Wiley and Sons, 1995.
- [8] Benini E., Toffolo A., *Optimal design of horizontal-axis wind turbines using blade-element theory and evolutionary computation*, J Sol Energy Eng, 124(4): 357-63, 2002.
- [9] Cai X., Zhu J., Pan P., Gu R., *Structural optimization design of horizontal-axis wind turbine blades using a particle swarm optimization algorithm and finite element method*, Energies, 5: 4683-96, 2012.
- [10] Dal Monte A., Raciti Castelli M., Benini E., *Multi-objective structural optimization of a HAWT composite blade*, Compos Struct, 106: 362-73, 2013.
- [11] Hu W., Han I., Park SC., Choi DH., *Multi-objective structural optimization of a HAWT composite blade based on ultimate limit state analysis*, J Mech Sci Technol, 26(1): 129-35, 2012.
- [12] Pourrajabiana A., Afsharb PAN., Ahmadizadehc M., Woodd D., *Aero-structural design and optimization of a small wind turbine blade*, Optim Methods Renew Energy Syst Des, 87 (Part 2): 837-48, 2016.
- [13] Bottasso CL., Campagnolo F., Croce A., *Multi-disciplinary constrained optimization of wind turbines*, Multibody Syst Dyn, 27(1): 21-53, 2012.
- [14] Ashuri T., Zaaijer MB., Martins JRRA., van Bussel GJW., van Kuik GAM., *Multidisciplinary design optimization of offshore wind turbines for minimum levelized cost of energy*, Renew Energy, 68 :893-905, 2014.
- [15] Grujicic M., Arakere G., Pandurangan B., Sellappan V., Vallejo A., Ozen M., *Multidisciplinary design optimization for glass-fiber epoxy-matrix composite 5 MW horizontal-axis wind-turbine blades*, J Mater Eng Perform, 19(8): 1116-27, 2010.
- [16] Zhu J., Cai X., Gu R., *Aerodynamic and structural integrated optimization design of horizontal-axis wind turbine blades*, Energies, 9(66), 2016.
- [17] Wang YZ., Li F., Zhang X., Zhang WM., *Composite wind turbine blade aerodynamic and structural integrated design optimization based on RBF meta-model*, Mater Sci Forum, 813 :10-8, 2015.

- [18] Ghommema M., Colliera N., Niemib AH., Caloa VM., *On the shape optimization of flapping wings and their performance analysis*, *Aerosp Sci Technol*, 32(1) :274-92, 2014.
- [19] Gillebaart E, De Breuker R., *Low-fidelity 2D isogeometric aeroelastic analysis and optimization method with application to a morphing airfoil*. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 305 :512-36, 2016.
- [20] Zingg DW, Nemec M, Pulliam TH., *A comparative evaluation of genetic and gradient-based algorithms applied to aerodynamic optimization*, *Eur J Comput Mech*, 17(1-2): 103-26, 2008.
- [21] D. Malcolm and A. Hansen, *WindPACT turbine rotor design study*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, vol. 5, 2002.
- [22] D. A. Griffin, *WindPACT Turbine design scaling studies technical area 1oeComposite blades for 80-to 120-meter rotor*, National Renewable Energy Laboratory Technical report, 2001.
- [23] B. Resor and T. Bushnell, *A 1.5 MW NuMAD Blade Model*, Draft Report, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2011.
- [24] F. R. Menter, *Zonal two equation k-turbulence models for aerodynamic flows*, AIAA paper, vol. 2906, p. 1993, 1993.
- [25] W. Jones and B. Launder, *The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence*, *International journal of heat and mass transfer*, vol. 15, pp. 301-314, 1972.
- [26] D. Wilcox and F. by Institutions, *Formulation of the k-omega Turbulence Model Revisited*.
- [27] N. N. Sorensen, J. 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, pp. 151-169, 2002.
- [28] J.-O. Mo and 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, pp. 81-92 , 2012.
- [29] J. D. Anderson Jr, *Fundamentals of aerodynamics*, New York: Tata McGraw-Hill Education, 2011.
- [30] A. Fluent, *Ansys fluent 15.0 theory guide*, Ansys Inc, 2013.
- [31] Souli, M. and Benson, D. J., *Arbitrary Lagrangian-Eulerian and Fluid-Structure Interaction*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 2010.