

Proposition projets doctoraux : Institut de l’Océan
Conception optimisée d’un parc éolien en mer, par simulation numérique du couplage Fluide-Structure et Machine-Learning

Équipe d’encadrement :

Adnan Ibrahimbegovic, Laboratoire Roberval, UTC (URL : <https://ibrahimb.pers.utc.fr/>)

Philippe Druault & Jean-François Krawczynski, Institut d’Alembert, Sorbonne Université (URL : <http://www.dalembert.upmc.fr/home/druault/index.php>)

Aperçu du projet

Dans le but d'accroître la part des énergies renouvelables dans son mix énergétique global, la Communauté européenne s'est lancée le défi de construire des éoliennes capables de fournir 10 MW d'électricité, soit le double des capacités maximales actuelles. Notre principale **hypothèse de recherche** est qu'une telle augmentation de la production ne peut être obtenue que grâce à des efforts combinés d'exploration : **i) innovation** technologique vers des éoliennes (de plus grande taille) avec des pales flexibles, modélisées et contrôlées comme des systèmes multi-corps flexibles afin de garantir leurs stabilité et intégrité sous des conditions de vent extrêmes ; **ii) exploitation** de l'approche dite 'système de systèmes' afin d'optimiser les performances de chaque unité dans les parcs d'éoliens.

Impact principal

Ce projet de thèse propose une nouvelle conception optimisée d'un parc d'éoliennes en mer dont le but est d'améliorer le système dominant actuel à pales rigides développé pour les sites offshore au Danemark et dans le nord de l'Allemagne, qui offrent des conditions presque optimales avec des vents constants.

· La première amélioration concerne les outils de simulation et de filtrage stochastique qui recherchent la performance optimale des parcs éoliens sous des vitesses de vent variables sur des sites offshore en France.

· La deuxième amélioration concerne les modèles numériques de dynamique non linéaire des grandes éoliennes à pales flexibles qui offriront une sécurité améliorée dans des conditions de vent extrêmes, ce qui permettra d'augmenter les vitesses de vent opérationnelles les plus élevées et donc de mieux exploiter les ressources éoliennes. Ces deux outils seront combinés avec la technologie du « jumeau numérique » afin de fournir le résultat optimal souhaité pour différentes conditions et climats de la mer ou du site (voir Figure 1).

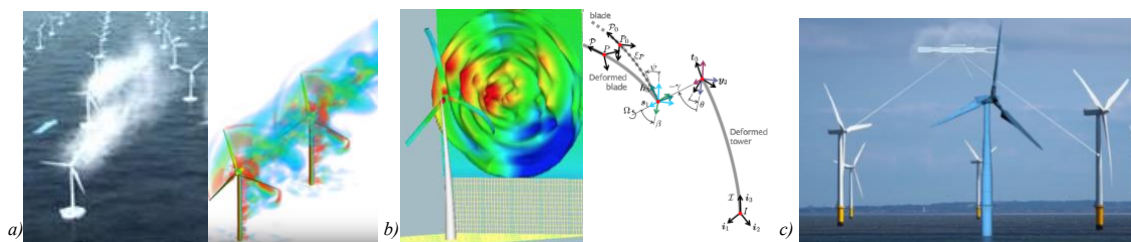


Fig. 1. – Relever le défi des 10 MW : a) calculs des charges du parc éolien avec une puissance réduite pour chaque éolienne en raison des sillages et des forces de traînée ; b) estimations stochastiques de l'état de contrainte sous les charges du vent avec risque de rupture par fatigue ; c) technologie de « jumeau numérique » pour les estimations des conditions du site

Afin de **quantifier plus précisément les marges de progrès existantes**, nous notons que le système éolien germano-danois, actuellement majoritairement utilisé en France, ne reste opérationnel en moyenne que 24,7 % du temps. De plus, même les conditions de vent optimales ne permettent pas de fournir la production maximale, car les pales sont arrêtées pour des vitesses de vent supérieures à 90 km/h (par exemple, seulement 78,8 % de la pleine capacité a été fournie par la tempête Ciara qui a frappé la France le 10 février 2020, car les turbines du site côtier ont dû être éteintes en raison de vitesses de vent atteignant 120 km/h).

Objectif scientifique

Cette proposition a pour objectif de contribuer à faire progresser les connaissances scientifiques qui peuvent rendre une telle augmentation de performance possible et fournir la base d'une plateforme de prise de décision, via le développement de nouveaux outils de filtrage non linéaire de processus stochastique fournissant de meilleures estimations des charges de vent de chaque unité placée dans un parc éolien. Elle devrait permettre également d'établir de nouveaux modèles numériques offrant une précision des contraintes (chargement aérodynamique) sous des vents variables dans des simulations de dynamique non linéaire à long terme adaptées aux évaluations de sécurité en matière de fatigue et/ou de charges extrêmes. Dans ce qui suit nous allons illustrer les détails de mise en œuvre du projet encadré par une équipe, aux compétences complémentaires, composée de chercheurs de l'UTC pour la partie numérique des solides et interaction, et par des chercheurs de Sorbonne Université pour la partie modélisation Fluide et turbulence.

Les éoliennes fonctionnant en mer dans des environnements très transitoires et instables sont soumises : (i) à une aérodynamique complexe en raison de la turbulence (larges variations d'échelles intégrales, intermittence) de l'écoulement et des changements de direction du vent, etc., (ii) et à des forces mécaniques du vent et des conditions de charge, augmentant ainsi le risque de défaillance de l'éolienne, notamment en raison de la charge de fatigue.

La plupart des modèles actuels utilisés pour représenter les déformations des pales sont basés sur des poutres élastiques continues. Cependant, les pales d'éoliennes ont une forme complexe et sont constituées de matériaux composites présentant une forte anisotropie de leur comportement mécanique. Bien que plusieurs études récentes aient inclus la flexibilité des pales dans les modèles et les simulations, des recherches supplémentaires sont nécessaires sur les aspects numériques voire expérimentaux.

Dans le projet de recherche proposé, un modèle d'interaction fluide-structure (FSI) sera développé, basé sur le couplage de la modélisation aérodynamique des pales qui seront considérées comme « hyper » flexibles, et de leur comportement vibratoire. Ce modèle couplera l'état flexible structural des pales de l'éolienne et l'écoulement du fluide environnant dans diverses conditions d'écoulements et de météorologie. L'objectif principal du travail de thèse sera donc de développer un code de simulation numérique tri-dimensionnel prenant en compte ces interactions fluide-structure afin d'étudier les effets de charge et la stabilité des pales d'éoliennes « hyper » flexibles.

Pour répondre à cet objectif, les différentes étapes du projet sont résumées dans ce qui suit.

- Les caractéristiques hydrodynamiques autour l'éolienne mer seront déterminées par un modèle couplé Fluide-Structure basé sur les équations de Navier-Stokes pour le milieu fluide et les équations de Newton pour la simulation des mouvements de corps rigide. Ce modèle couplé Fluide-Structure (voir [1]), open source et développé à l'UTC sous environnement Openfoam, permet de résoudre des problèmes d'interaction entre des écoulements de fluides incompressibles et des corps solides complexes en mouvement libre et de grande amplitude, comme c'est le cas d'une éolienne. Ce modèle intègre la méthode des frontières immergées (IBM) pour tenir compte de la présence du Solide dans le milieu fluide, ceci en adoptant la méthode de maillage non conforme pour le corps rigide. Cette approche permet à la structure rigide de se déplacer librement et de manière arbitraire au sein d'un fluide visqueux incompressible sans avoir recours au contrôle du maillage autour du solide.
- Les conditions d'entrée réalistes seront synthétiquement générées afin de rendre compte et contrôler certaines des caractéristiques d'un écoulement réel, notamment niveau de turbulence en amont et/ou dans le sillage de l'éolienne (variations des échelles intégrales, de l'intermittence, des densités spectrales de vitesse,) ; voir [2,3].
- Les différentes conditions d'écoulements turbulents seront alors successivement considérées en entrée du code de calcul, permettant d'étudier l'effet des propriétés de l'écoulement amont (intermittence, structures tourbillonnaires, niveau de turbulence, ...) non seulement sur la fatigue structurelle des pales des éoliennes mais également sur les couplages aéroélastiques induits. L'effet de la nature des matériaux utilisés sur l'aéroélasticité des pâles de l'éolienne sera également analysé.
- Les charges aérodynamiques sont généralement obtenues par la BEM (Blade Element Momentum). Cette méthode permet à un coût de calcul très réduit, de déterminer les courbes de performance d'une turbine à partir uniquement de la connaissance des caractéristiques géométriques des pales d'une turbine

donnée ainsi que des vitesses d'écoulement auxquelles la turbine est soumise. Il s'agira alors de développer un code de calcul BEM instationnaire utilisant en entrée des données de vitesses variables et instationnaires. Les efforts calculés par BEM basés sur des conditions d'entrée réalistes seront alors analysés à l'aide de la DEL (Damage Equivalent Load) permettant d'identifier au premier ordre les caractéristiques physiques des écoulements turbulents responsables de la fatigue structurelle. Ces données de chargement instationnaires pourront également être intégrées dans le modèle fluide-structure évoqué ci-dessus.

- Le modèle structurel sera de type poutre pour représenter le comportement des pales de la manière la plus réaliste possible, en tenant compte de l'anisotropie des matériaux, de la géométrie réelle de la pale et du couplage des déformations ; voir [4].

On s'attend à ce que les performances optimales des systèmes d'éoliennes existants soient améliorées grâce aux pales « hyper » flexibles. A noter que l'hyper flexibilité des pales peut être un avantage pour que l'éolienne démarre dans des conditions de vent doux, mais peut être un inconvénient pour maintenir l'éolienne opérationnelle et stable par vent fort. Des situations extrêmes et des scénarios similaires à ceux rencontrés en offshore seront étudiés numériquement pour établir les limites d'utilisation en toute sécurité des pales « hyper » flexibles.

Le code numérique développé dans le cadre de cette thèse permettra en outre d'étudier les effets de sillage pour les éoliennes à pales « hyper » flexibles. Une analyse du sillage d'une telle éolienne sera également effectuée en considérant des jeux de données d'entrée de vitesse aux caractéristiques variables.

L'étape finale de la thèse sera l'intégration du code développe avec les outils d'apprentissage afin de proposer un produit de type « jumeaux numériques » (voir [5]) permettant d'optimiser un parc éolien pour des sites côtiers en France.

Bibliographie

[1] A. Ibrahimbegovic, R. Niekamp, C. Kassiotis, D. Markovic, H. Matthies, 'Code-coupling strategy for efficient development of computer software in multiscale and multiphysics nonlinear evolution problems in computational mechanics', *Advances in Engineering Software*, 72, 8-17, (2014)

[2] Ph. Druault, J-F. Krawczynski, E. Can, G. Germain, 'On the necessity of considering the hub when examining the induction of a horizontal axis tidal turbine', *Renewable Energy*. Vol. 224 120107, (2024) doi.org/10.1016/j.renene.2024.120107

[3] Ph. Druault, J-F. Krawczynski (2023) Numerical investigation of the spatial integration effect on the velocity spectrum: Consequences in the wind or tidal turbine power spectrum. *Computers & Fluids* Vol. 250, 105729, (2023). doi.org/10.1016/j.compfluid.2022.105729

[4] A. Ibrahimbegovic, R.A. Mejia Nava, 'Structural Engineering: Models and Methods for Statics, Instability and Inelasticity', Springer, 1-547, (2023). <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-23592-4>

[5] A. Ibrahimbegovic, 'Synergy between Multiphysics / Multiscale Modelling and Machine Learning', *Journal Computation*, MDPI, (2024). https://www.mdpi.com/journal/computation/special_issues/MKOK8981C1