

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Apport du couplage fluide structure haute-fidélité pour la modélisation des éoliennes nouvelle génération

Référence : **MAS-DAAA-2022-14**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 2022

Date limite de candidature :

Mots clés

Aéroélastique ; Aérodynamique ; Simulation numérique ; Eolien

Profil et compétences recherchées

Master 2 recherche en aéroélasticité / Mécanique des fluides

Compétences en aéro-élasticité numérique, CFD, mécanique des fluides, connaissance du domaine éolien

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Les stratégies de réduction des coûts des énergies renouvelables conduisent au développement d'éoliennes de taille croissante, implantées dans des environnements bénéficiant de conditions de vent favorables d'un point de vue énergétique, mais difficiles en termes de sollicitations (aujourd'hui éolien en mer posé, demain flottant). Par exemple, la hauteur de la nouvelle turbine Halyade-Xde General Electric approche celle de la Tour Eiffel, pour une commercialisation en sites offshore à l'horizon 2021. Le développement technologique de cette nouvelle génération d'éoliennes soulève de nouveaux problèmes de design ; l'augmentation de la taille étant en effet limitée par la double contrainte masse-résistance de la structure (55 tonnes pour chaque pale de 107 m dans le cas de l'Halyade-X) ; aussi construire des pales très rigides conduit à des masses trop importantes, tandis qu'à l'inverse des pales légères sont nécessairement plus souples. De plus en plus critique, le couplage aéroélastique est donc à prendre en compte dès les phases de design : à la fois pour vérifier que la gamme de fonctionnement du rotor n'est pas affectée par des instabilités aéroélastiques ; mais aussi pour exploiter le couplage aéroélastique directement à des fins de contrôle passif.

Les phénomènes aéroélastiques sont caractérisés par l'interaction entre les déformations de la structure et l'écoulement du fluide environnant. Dans certains cas, seule la prise en compte simultanée de la dynamique fluide/élastique permet de reproduire le comportement observable. Par exemple, le phénomène de flottement classique survient par un couplage de modes de vibration structuraux par l'intermédiaire du fluide. Il se traduit par l'apparition d'oscillations parfois violentes, et on doit donc à tout prix éviter que la zone de fonctionnement de l'éolienne outrepassé les limites de stabilité, au risque de générer d'important niveaux de fatigue, voire des ruptures dans les cas extrêmes. Si la taille des pales n'est pas directement liée aux seuils de flottement [1], la conception mécanique de plus en plus complexe des pales de grande taille rend la détermination des seuils plus délicate. Un autre phénomène auquel sont soumises les éoliennes est le flottement de décrochage: en effet, dans certaines conditions une partie du rotor voit des angles d'attaque trop importants pour que l'écoulement reste attaché. Les efforts aérodynamiques qui en résultent peuvent alors devenir déstabilisants pour la structure et générer des vibrations, qui en retour affectent la dynamique du fluide. De plus, l'écoulement est alors fortement instationnaire du fait d'un lâcher tourbillonnaire important en aval des pales, ce qui induit la présence de nouvelles constantes de temps au sein du système. Ce phénomène, à la fois naturellement tridimensionnel et instationnaire, est aujourd'hui mal reproduit par les outils classiques de calcul [2]. Par-rapport au cas d'une aile isolée, dans le cas d'une éolienne ces phénomènes sont de plus couplés à la dynamique du sillage en rotation en aval du rotor, ce qui rend la caractérisation aéroélastique encore plus délicate. Ces deux exemples illustrent la complexité des phénomènes en jeu, et aussi les limites actuelles dans leur caractérisation. Tout progrès dans ce domaine est pourtant crucial, à la fois pour garantir des designs sûrs, mais aussi optimisés, en témoigne par exemple le développement actuel de pales où la structure composite est organisée afin de coupler la flexion et la torsion (bend-twist coupling, BTC) ; l'idée étant de faire en sorte qu'une flexion excessive des pales entraîne une déformation en torsion qui conduit à une réduction naturelle de l'angle d'attaque, et limite ainsi les chargements.

En pratique, deux situations extrêmes, prévues dans les tests de certification, sont particulièrement dimensionnantes :

1. Le cas où l'éolienne à l'arrêt est soumise à un vent fort (typiquement des vents d'une quarantaine de m/s) venant de travers : des phénomènes de flottement de décrochage ont été rencontrés dans ce cas, conduisant à des vibrations violentes.
2. Le cas où l'éolienne en rotation subit un arrêt d'urgence : typiquement, cette procédure est enclenchée lorsque la vitesse de rotation dépasse un certain seuil. D'après la norme IEC-61400, elle peut être réalisée en agissant sur l'aérodynamique (mise en drapeau des pales) et/ou la mécanique (frein appliqué à l'arbre de transmission). Ce cas génère généralement les niveaux de contraintes maximum rencontrés dans la vie d'une éolienne

Ces deux scénarios font partie des configurations les plus extrêmes en termes de sollicitations mécaniques pour la structure, et constituent donc un challenge en matière de simulation, pour plusieurs raisons.

Premièrement, la grande majorité des calculs utilisés dans l'éolien s'appuient sur des méthodes de type BEM (Blade-Element Momentum), qui se basent sur un simple bilan de quantité de mouvement le long d'un tube de courant passant au travers du rotor de l'éolienne, tandis que les efforts aérodynamiques sont déterminés via la simple lecture de tables de polaires prédéterminées. Par construction, ces méthodes ne peuvent donc pas naturellement capturer les effets tridimensionnels et instationnaires et doivent donc être enrichies par de nombreuses corrections plus ou moins empiriques, ce qui rend ces méthodes très peu génériques. De plus, les paramètres typiques de ces corrections ont en général été déterminés vis-à-vis de résultats expérimentaux obtenus dans le cas de rotors de petite taille, or on ne dispose en général pas de données de validation pour des éoliennes de grande taille. Ceci pose donc la question de la validité générale des modèles. Ces limitations impliquent le recours à des marges de sécurité exagérément grandes, qui pourraient être réduites si la confiance en les outils de calculs était renforcée.

Deuxièmement, les deux phénomènes transitoires décrits ci-dessus entraînent une réponse très fortement couplée du fluide et de la structure des pales : on est typiquement dans un cas où le comportement global ne peut pas s'étudier en traitant le fluide et le solide séparément. Une approche fortement couplée des deux physiques devient alors indispensable. Si récemment l'apport de telles approches [3, 4] a été évaluée pour des cas de fonctionnement en régime établi, l'application à des cas de fonctionnements transitoires tels que ceux décrits ci-dessus reste à explorer.

L'objectif de la thèse est ainsi d'aller un cran plus loin en termes de finesse de simulation, c'est-à-dire de réaliser des simulations aéroélastiques couplant une modélisation élastique par éléments finis de la structure à de la CFD (Computational Fluid Dynamics, i.e. résolvant directement les équations de Navier-Stokes associées à un modèle de turbulence) pour l'aérodynamique, capable de capturer les phénomènes transitoires décrits ci-dessus.

Le cas d'application sera une éolienne générique de grande taille (rotor de 120 mètres de diamètre) représentatif de la génération à venir d'éoliennes offshore. Deux principales avancées sont attendues :

- Premièrement, il sera alors possible d'évaluer dans quelle mesure les marges de sécurité liés à l'emploi de méthodes à plus basse fidélité (BEM ou méthodes vortex) pourraient être réduites, et d'ajuster ces modèles grâce aux résultats du calcul haute-fidélité.
- Deuxièmement, l'approche proposée permettra d'explorer les phénomènes physiques en jeu à des échelles plus fines que ce qui est accessible par les méthodes usuellement utilisées. On pourra en particulier étudier en détail la dynamique fluide-structure qui provoque les vibrations. Cette dynamique est encore mal comprise à ce jour, or seule une meilleure compréhension de ces phénomènes permettra de proposer des designs intégrant directement l'aéroélasticité dans les critères d'optimisation.

Collaborations envisagées

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Aérodynamique, Aéroélasticité, Acoustique

Lieu (centre ONERA) : Châtillon

Contact : Y. Mauffrey@onera.fr

Tél. : 0146734638

Email :

yann.mauffrey@onera.fr

Directeur de thèse

Nom :

Laboratoire :

Tél. :

Email :

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>