

PROPOSITION DE STAGE DE MASTER + THESE 2015

DGA/AMU

Modélisation et optimisation d'un rotor à pales flexibles

Pour candidater: envoyer CV et lettre de motivation aux encadrants

avant le 19 décembre 2014

Lieu :

IRPHE, UMR 7342, Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, 49, rue Joliot Curie, F-13013 Marseille

Indemnités de stage de Master: environ 450 euros par mois.

Financement de la thèse: Bourse DGA/AMU dans le cadre du "Club des partenaires" (Financement du sujet acquis). Rémunération: Environ 1800 euros brut par mois. Durée: 36 mois.

Encadrement :

Christophe Eloy, Professeur Centrale Marseille (eloy@irphe.univ-mrs.fr)
Stéphane Le Dizès, DR CNRS (ledizes@irphe.univ-mrs.fr)

Type de sujet : Etude théorique / numérique

Mots clefs : Aérodynamique; Rotors; Interactions fluide-structure; Optimisation; Instabilité; Hélicoptère; Eolienne; Drone.

I. Contexte général

L'objet de cette thèse entre dans le contexte général des écoulements de rotors. Les rotors se retrouvent dans des applications très diverses, allant de l'éolienne aux hélicoptères, en passant par un grand nombre de dispositifs de propulsion, de sustentation et de pompage. Chaque application ayant ses propres besoins et ses propres contraintes d'utilisation, on trouve une grande variété de rotors. Dans cette thèse, on s'intéressera essentiellement aux rotors d'éoliennes et d'hélicoptères.

Bien que la flexibilité des pales soit prise en compte dans le fonctionnement d'un rotor d'hélicoptère depuis très longtemps (voir par exemple Goland 1953), elle n'est que rarement considérée dans le design du rotor. Pourtant, avec l'apparition des hélicoptères miniatures (drones), pour lesquels les contraintes d'utilisation sont très différentes de celles d'un hélicoptère classique, nous pensons que la flexibilité des pales pourrait être mise à profit pour accroître les performances du rotor. Des pales très flexibles sont d'ailleurs déjà utilisées sur certains drones (Sicard & Sirohi, 2012) afin d'augmenter leur résistance mécanique et leur adaptabilité aux milieux. Cependant les rotors de ces drones ne sont pas optimisés d'un point de vue aérodynamique, ce qui réduit leurs performances et leur rayon d'action. Un des objectifs de cette thèse est de réaliser une telle optimisation.

Pour les éoliennes, les contraintes d'utilisation sont différentes. Même si on arrive maintenant à optimiser un rotor d'éolienne pour une configuration de vent donné, les industriels désireraient faire fonctionner ces mêmes éoliennes en parc et pour des conditions

de vent beaucoup plus étendues tout en gardant le même rendement (Hansen et al. 2006). Bien connaître l'écoulement en aval d'une éolienne et comprendre les mécanismes responsables de la déstructuration de son sillage sont les premières étapes en vue de concevoir des rotors ayant un faible impact pour les éoliennes en aval. Par ailleurs, pour élargir le domaine de fonctionnement de l'éolienne, il est nécessaire que le rotor s'adapte aux conditions de vent. Introduire une flexibilité dans les pales pourrait permettre de remplir cet objectif en réduisant la « voilure » par vent fort. Cet effet modifiera également la structure du sillage d'une manière que l'on cherchera à quantifier.

Quand la flexibilité des pales est importante, de nouveaux phénomènes peuvent apparaître comme les instabilités aéroélastiques ou instabilités de « flutter » (Dowell 2001 ; Païdoussis 2004), ou le décrochage dynamique (Carr 1988). Ce dernier phénomène apparaît également sur des pales rigides lorsque l'écoulement est instationnaire (ailes battantes ou pale d'hélicoptère en vol d'avancée). Sa modélisation se fait de manière essentiellement empirique (Mulleners & Raffel 2012). Dans la thèse, on cherchera à comprendre dans quelles conditions un tel décrochage peut se produire sur des pales flexibles et comment l'éviter.

II. Programme scientifique

Un rotor à pales flexibles en rotation constitue une interaction fluide-structure à couplage fort, le rotor générant un écoulement qui, en retour, déforme les pales et affecte donc l'écoulement généré. La structure tridimensionnelle de l'écoulement rend sa modélisation complexe et sa description fine excessivement lourde numériquement. Les moyens de calcul actuels ne permettant pas d'envisager de faire une procédure d'optimisation, ni même une étude paramétrique extensive, certaines simplifications sont nécessaires dans la description de cet écoulement. Nous proposons donc de développer une approche physique de ce système déformable en complexifiant progressivement les modèles utilisés pour l'écoulement et le comportement mécanique des pales. Cette étude théorique sera effectuée en parallèle à une étude expérimentale également réalisée dans l'équipe.

On étudiera plus particulièrement la configuration d'un rotor placé dans un écoulement uniforme parallèle à son axe de rotation. Le rotor pourra être mis en rotation forcée afin de pouvoir décrire non seulement une éolienne, mais également un hélicoptère en vol vertical (ascendant, descendant ou stationnaire).

Interactions fluide-structure (sans sillage)

La première tâche sera de considérer un problème quasi-statique et quasi-bidimensionnel afin de calculer les configurations d'équilibre et leur stabilité. Dans cette approximation, les forces et moments s'exerçant sur chaque section de pale sont identiques à ceux obtenus dans une configuration statique. Ils ne dépendent donc que de la vitesse relative entre la pale et le fluide environnant. Dans un premier temps, on négligera donc l'écoulement induit par le sillage hélicoïdal du rotor. Ces forces et moments exercés par le fluide sur la structure se couplent ensuite à la dynamique de flexion et de torsion de la pale au travers d'une équation de poutre.

Dans cette première tâche, nous examinerons les équations dynamiques couplées de la pale afin d'identifier les solutions d'équilibre et leur stabilité. Selon la répartition de la masse et les profils de rigidité en flexion et torsion de la pale, il est en effet possible que ce couplage fluide-structure conduise à une instabilité aéroélastique de type « flutter ».

Dynamique du sillage seul

Parallèlement à la précédente tâche, l'étudiant(e) analysera les différents modèles de la littérature permettant de décrire le sillage d'un rotor (rotor de Joukowski, rotor de Betz, etc).

Il(elle) développera un code de calcul utilisant la méthode vortex développée par Leishman *et al.* (2002) pour décrire le sillage (figure 1).

Dans cette approche, l'écoulement est supposé composé d'un nombre prescrit de tourbillons. Chaque tourbillon est discrétisé en petits segments de vorticités dont la vitesse induite peut être calculée de manière exacte par la formule de Biot & Savart (voir Leishman 2006). Chaque segment est ensuite déplacé en utilisant le champ de vitesse généré par les autres segments.

Dans un premier temps, on considérera une configuration simple où chaque pale génère des tourbillons concentrés en bout et pied de pale, de circulation constante (rotor de Joukowski). On cherchera à retrouver les instabilités du sillage hélicoïdal prévues par la théorie (Widnall 1972; Okulov & Sorensen 2007) et observées expérimentalement pendant la thèse d'H. Bolnot dans la configuration éolienne (Bolnot *et al.* 2011; Bolnot 2012).

On analysera également les transitions du sillage lorsque l'écoulement relatif du rotor par rapport à l'écoulement extérieur est modifié (configuration hélicoptère). On cherchera en particulier à identifier et caractériser la transition vers l'anneau tourbillonnaire (Vortex Ring State) qui se produit lors d'un vol de descente (Stack 2004).

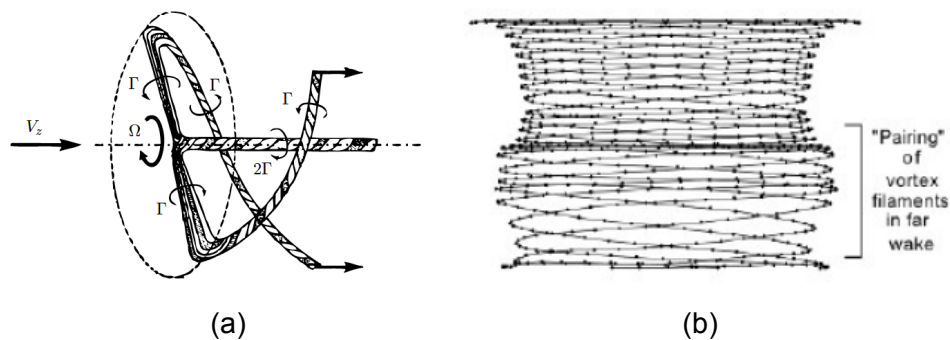


Figure 1: (a) Rotor de Joukowski. (b) Sillage d'un rotor en vol descente obtenu par la méthode vortex (d'après Leishman *et al.*, 2002).

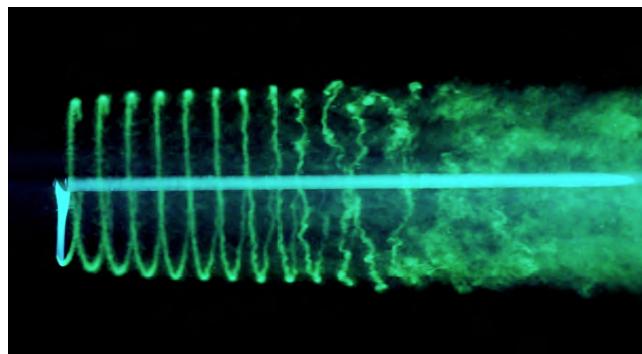


Figure 2: Sillage d'un rotor à une pale visualisé à l'aide de fluorescéine. (Bolnot 2012).

Dynamique couplée pale-sillage

Une fois établies, d'une part, les équations du mouvement d'une pale sans sillage (1^{ère} tâche) et, d'autre part, la dynamique du sillage et l'écoulement associé (2^{ème} tâche), il s'agira de coupler ces deux approches pour considérer un problème plus réaliste d'un rotor à pales flexibles sensible à l'écoulement généré par son propre sillage. Pour modéliser une telle interaction, on écrira un code numérique dans lequel les pales sont modélisées comme des poutres flexibles en torsion et en flexion, placées dans un écoulement qui dépend du sillage qu'elles génèrent. Cet écoulement induit sera calculé à chaque pas de temps à l'aide du code qui décrit le sillage par la méthode vortex. Cependant les caractéristiques des tourbillons seront modifiées au court du temps afin de prendre en compte les modifications du profil d'aile. Dans un premier temps, on pourra imaginer de calculer à chaque pas de temps

la circulation moyenne de chaque pale, et de placer toute cette circulation dans un tourbillon unique, lâché en bout de pale ou au barycentre de la circulation générée.

Cette approche permettra de caractériser, en fonction des qualités aérodynamiques des pales, de leurs flexibilités et de leur inertie, les différents régimes de fonctionnement du rotor pour une vitesse relative du rotor donnée. On s'intéressera notamment aux limites de stabilité du système vis-à-vis des instabilités de couplage fluide-structure, et aux conditions d'apparition d'un décrochage dynamique sur les pales. On étudiera également les modifications que les propriétés de flexibilité des pales induisent sur les instabilités du sillage.

Optimisation

La tâche précédente devrait permettre d'identifier les gammes de paramètres donnant lieu à des régimes stables de fonctionnement du rotor. Dans ces régimes, nous chercherons à introduire une procédure d'optimisation afin de maximiser ou minimiser certaines propriétés du rotor. Pour la configuration éolienne, on cherchera à maximiser l'énergie extraite de l'écoulement. On pourra également essayer de favoriser les instabilités se développant dans le sillage, afin d'accélérer la transition vers la turbulence. Pour la configuration hélicoptère, on cherchera à maximiser la force de poussée pour une énergie injectée constante. Dans les deux cas, on jouera sur plusieurs paramètres comme la variation du profil de la pale (corde, angle d'attaque, profil aérodynamique), la variation de sa flexibilité (en flexion et en torsion) ainsi que sur son inertie (répartition de la masse).

Comparaison théorie-expérience

L'étude théorique/numérique réalisée dans cette thèse sera effectuée en parallèle aux études expérimentales réalisées au sein de l'équipe par T. Leweke sur les écoulements de rotors. Les résultats de stabilité du sillage du rotor rigide seront directement comparés aux résultats expérimentaux. La réalisation de rotors flexibles est également envisagée et leur conception s'appuiera sur les résultats obtenus dans la thèse. L'étudiant(e) interviendra alors dans la conception du rotor flexible ainsi que dans l'analyse des résultats et pourra s'il(elle) le souhaite également participer aux campagnes de mesure. Cette étude expérimentale devrait permettre non seulement d'illustrer les phénomènes découverts mais aussi de valider les résultats dans une configuration réelle.

Plan de travail

	Année 1				Année 2				Année 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
IFS sans sillage												
Dynamique du sillage												
Dynamique pale-sillage												
Optimisation												
Comparaison théorie-expérience												
Rédaction et soutenance												

III. Cadre scientifique et encadrement

L'étude sera réalisée au sein de l'équipe "Aérodynamique" d'IRPHE dont deux des thématiques principales sont la dynamique des tourbillons et l'étude des interactions fluide-structure.

Stéphane Le Dizès est un théoricien, spécialiste de dynamique tourbillonnaire et des instabilités. Il intervient dans des projets sur la dynamique des tourbillons en lien avec les sillages d'avions et de rotors depuis 2000 (Contrat DGA/ONERA/Dassault sur l'éclatement

tourbillonnaire 2000-2002, Contrats européens C-Wake 2000-2002, Far-Wake 2004-2008, Contrat ANR Vortex 2005-2008, Contrat ANR Helix 2013-2017). Depuis 2009, il a des contrats avec Airbus Helicopters sur les problèmes de transition de sillage d'un hélicoptère. Il collabore également activement avec l'équipe de Prof. Sørensen au DTU Copenhagen sur les problèmes spécifiques des éoliennes. Depuis toujours, il travaille en étroite collaboration avec T. Leweke (responsable de l'équipe) qui a mis au point la plupart des dispositifs expérimentaux qui seront utilisés pour l'étude expérimentale.

Christophe Eloy est spécialiste des instabilités en interaction fluide-structure. Il a coordonné un projet ANR sur le sujet (projet DRAPEAU 2006-2010) et a été lauréat d'une bourse Marie Curie permettant un séjour de deux ans à l'Université de Californie San Diego (projet FLAGELLA 2010-2013). Depuis 2013, il est également éditeur associé de la revue principale sur le sujet : *Journal of Fluids and Structures*. Enfin, il collabore avec la société AJC Concept pour la mise au point d'une éolienne à aile battante flexible.

Références

- H. Bolnot. 2012 Instabilités des tourbillons hélicoïdaux : application au sillage des rotors. Thèse de l'Université Aix-Marseille. Dir: S. Le Dizès & T. Leweke.
- L. W. Carr. 1988. Progress in analysis and prediction of dynamic stall. *J. Aircraft*, **25**, 6-17.
- E. H. Dowell, K. C. Hall. C. 2001. Modeling of fluid-structure interaction. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **33**, 445-490.
- L. Goland. 1953 The effects of rotor blade flexibility and unbalance on helicopter hovering stability and control. Report No. 128, Aeronautical Engineering Laboratory, Princeton University.
- J. G. Leishman. 2006 *Principles of helicopter aerodynamics*. Cambridge Aerospace Series.
- J. G. Leishman, M. J. Bhagwat, A. Bagai. 2002. Free-vortex filament methods for the analysis of helicopter rotor wakes. *Journal of Aircraft*, **39**, 759-775.
- M. O. L. Hansen, J. N. Sørensen, S. Voutsinas, N. Sørensen, H. Madsen. 2006 State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity. *Progr. Aerosp. Sci.*, **42**, 285-330.
- K. Mulleners, M. Raffel. 2012. The onset of dynamic stall revisited. *Exp. Fluids*, **52**, 779--793.
- V. L. Okulov, J. N. Sørensen. 2007 Stability of helical tip vortices in a rotor far wake. *J. Fluid Mech.*, **576**, 1-25.
- V. L. Okulov, G. A. Van Kuik. 2012 The betz-joukowski limit : on the contribution to rotor aerodynamics by the british, german and russian scientific schools. *Wind Energy*, **15**, 335-344.
- M. P. Païdoussis. 2004. Fluid-Structure Interactions. *Elsevier Academic Press*.
- J. Stack. 2004 Experimental investigation of rotor vortex wakes in descent. AIAA Paper 2004-0297.
- J. Sicard, J. Sirohi. 2012 Experimental study of an extremely flexible rotor for micro helicopters *J. Aircr.*, **49** 1306-14
- S. E. Widnall. 1972 The stability of a helical vortex filament. *J. Fluid Mech.*, **54**, 641-663.

Références des directeurs de thèse liées au sujet

- H. Bolnot, S. Le Dizès, T. Leweke. 2011. Spatio-temporal development of instabilities in helical vortices. 6th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference, 27-30 June 2011, Honolulu, Hawaii, USA. AIAA Paper 2011-3927.
- H. Bolnot, S. Le Dizès, T. Leweke. 2014. Spatio-temporal development of the pairing instability in an infinite array of vortex rings. *Fluid Dyn. Research*. (accepted).
- U. Ehrenstein, C. Eloy. 2013. Skin friction on a moving wall and its implications for swimming animals. *J. Fluid Mech.* **718**, 321-346.
- C. Eloy. 2013. On the best design for undulatory swimming. *J. Fluid Mech.* **717**, 48-89.
- C. Eloy, N. Kofman, L. Schouveiler. 2012. The origin of hysteresis in the flag instability. *J. Fluid Mech.* **691**, 583-593.
- C. Eloy, R. Lagrange, C. Souilliez, L. Schouveiler. 2008. Aeroelastic instability of cantilevered flexible plates in uniform flow. *J. Fluid Mech.* **611**, 97-106.
- C. Eloy, C. Souilliez, L. Schouveiler. 2007. Flutter of a rectangular plate. *J. Fluids Struct.* **23**, 904-919.
- S. Le Dizès, F. Laporte. 2002. Theoretical predictions for the elliptical instability in a two-vortex flow. *J. Fluid Mech.* **471**, 169-201
- P. Meunier, S. Le Dizès, T. Leweke. 2005. Physics of vortex merging, *C. R. Physique* **6**, 431-450.
- C. Roy, N. Schaeffer, S. Le Dizès, M. Thompson. 2008. Stability of a pair of co-rotating vortices with axial flow. *Phys. Fluids* **20**, 094101.