

## Lâcher tourbillonnaire à l'arrière des pales d'une turbine Darrieus

Ervin Amet, Christian Pellone, Thierry Maitre & J-L Achard

LEGI  
BP 53, 38401 Grenoble Cedex 9  
Ervin.amet@hmg.inpg.fr

### Résumé :

*Le travail présenté a pour objectif la modélisation bidimensionnelle de l'écoulement tourbillonnaire dans une turbine Darrieus bipale droite. Dans une telle configuration l'incidence de l'écoulement sur les pales varie constamment sur un tour, provoquant des décollements dynamiques importants ainsi que de fortes interactions pales / tourbillons. Les résultats expérimentaux de Lanneville et Vittecoq (1986), obtenus sur une turbine Darrieus bipale droite, mettent en évidence des structures tourbillonnaires lâchées par une pale et interagissant fortement avec celle-ci. En conséquence les courbes de traînée et de portance sur un cycle de rotation présentent une hystérésis significative. Les résultats numériques de Ploesteanu (2004), obtenus avec le code commercial FLUENT, reproduisent assez bien les grosses structures tourbillonnaires de l'écoulement mais celles-ci sont trop rapidement dissipées par le calcul. Pour ces raisons, un code de calcul RANS-K-omega (code académique TurbFlow) utilisant un maillage structuré par blocs et des schémas numériques peu dissipatifs a été choisi. Ce code a permis de retrouver les principales structures tourbillonnaires mises en évidence par l'expérience. Leur capture est suffisamment précise pour retrouver une hystérésis du cycle de portance conforme à celle mesurée dans l'expérience.*

### Abstract :

*This paper presents the results of a numerical investigation on the turbulent flow on a 2D Darrieus turbine. As the turbine rotates the incidence angle changes, involving strong unsteady effects in the flow field. The most important of them consists in a continuous dynamic stall of the flow which influences the performance of the turbine. The final objective of this work is to model precisely the flow on the two-NACA airfoils Darrieus turbine studied experimentally by Laneville and Vittecoq (1986). The numerical results obtained by Ploesteanu (2004) with the FLUENT solver highlights the main vortices in the flowfield but their intensity is too weak. In this work, the numerical model used to describe the flow is an explicit RANS K-omega code (academic Turbflow software) with a block-structured mesh allows that allows high order numerical schemes involving low numerical dissipation. In particular, an improvement of the dynamic stall modeling, compared with a previous numerical study (Ploesteanu (2003)), is obtained.*

**Mots-clefs : turbine Darrieus ; Décrochage dynamique ; Hystérésis de portance et de traînée**

### 1 Introduction

Le travail présenté a pour objectif la modélisation bidimensionnelle de l'écoulement tourbillonnaire dans une turbine Darrieus. Dans ces machines l'axe de rotation est perpendiculaire au sens de l'écoulement. Comme illustré figure 1, l'incidence de l'écoulement sur les pales varie constamment sur un tour, provoquant des décollements dynamiques importants ainsi que des fortes interactions pales / tourbillons. Ajoutant à la complexité des phénomènes en jeu, l'écoulement reste laminaire sur une partie variable des profils (nombre de Reynolds modéré de l'ordre  $10^5$ ). La prédiction de ces écoulements est cependant essentielle,

pour connaître la puissance récupérée par la turbine mais aussi pour prévoir les efforts cycliques sollicitant les pales en fatigue. Les résultats expérimentaux de Lanneville et Vittecoq (1986), obtenus sur une turbine Darrieus bipale droite de section NACA 0018, mettent en évidence des structures tourbillonnaires lâchées par une pale et interagissant fortement avec celle-ci. En conséquence les courbes de traînée et de portance sur un cycle de rotation présentent une hystérésis significative. Le code de calcul visqueux, Turbflow, est utilisé pour simuler le comportement d'une telle turbine. Il met en œuvre un modèle RANS  $k-\omega$  explicite sur la base d'une formulation compressible. Le code est parallélisé et fonctionne avec un maillage structuré par blocs.

## 2 Décrochage dynamique

La prédiction de l'écoulement dans toute sa complexité est importante, non seulement pour déterminer la puissance moyenne récupérée mais aussi pour anticiper les efforts cycliques qui induisent la fatigue des matériaux. En effet ces sollicitations périodiques affectent aussi la structure qui assure la fixation des turbines.

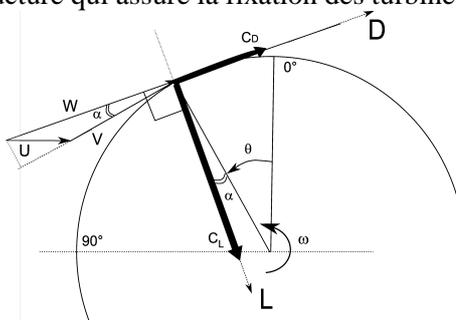


FIG. 1 – Représentation de l'angle d'incidence  $\alpha$

Le paramètre d'avance est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire d'avance de la pale et la vitesse de l'écoulement :

$$\lambda = \omega R / U$$

L'angle d'incidence et la vitesse relative sont données par:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right)$$

$$W = U \sqrt{1 + 2\lambda \cos \theta + \lambda^2}$$

où  $\omega$  est la vitesse angulaire,  $R$  est le rayon,  $U$  est la vitesse du fluide à l'amont,  $W$  est la vitesse relative de l'écoulement. Les efforts  $C_L$  et  $C_D$  sont ramenées à la vitesse relative du fluide.

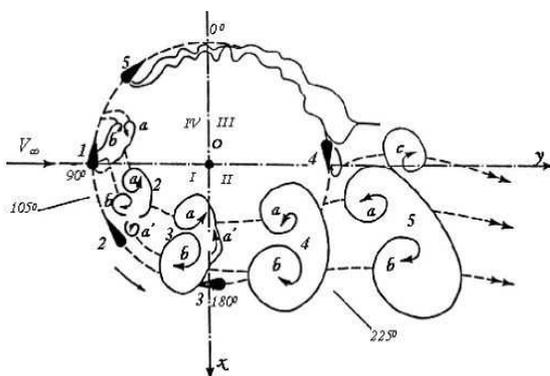


FIG. 2 Décrochage dynamique dans une turbine Darrieus,  $\lambda = 2$ , (Brochier et al., (1986)

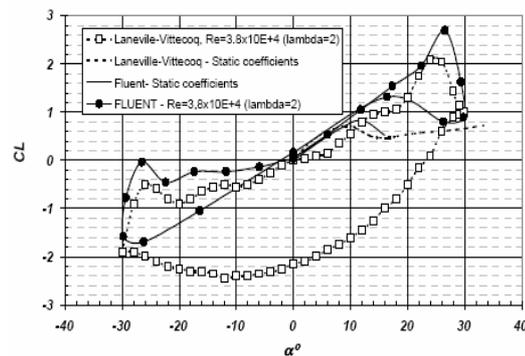


FIG. 3 - Coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence

La figure 3 présente l'évolution du coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence pendant un tour, pour un paramètre d'avancement de  $\lambda = 2$ . Cette valeur correspond à un décrochage dynamique intense des pales de la turbine. On peut remarquer la différence importante entre l'hystérésis expérimentale de la figure 3 (courbe avec des carrés) et celle issue de la simulation numérique effectuée avec le code Fluent (courbe points noirs). Les deux tourbillons contrarotatifs a et b (voir figure 2) sont bien prédits au début de la première étape de leur développement. Cependant, leur circulation diminue drastiquement dans la deuxième étape, qui correspond à leur convection à l'intérieur de la machine. Pour cette raison, l'écoulement se rattache prématurément à la pale, ce qui conduit à un comportement quasi-statique de l'écoulement dont la conséquence est l'évanescence de la boucle d'hystérésis.

### 3 Calcul numérique

Pour reproduire l'expérience de Lanneville et Vittecoq (1986), une turbine droite, bipale Darrieus, a été calculée, avec une corde de 0.061 m et un rayon de 0.3 m. Le forme de la pale est un profil symétrique NACA 0018. La corde est tangente au cercle de rotation, au point situé au  $\frac{1}{4}$  avant. Pour reproduire le cas  $\lambda = 2$ , la vitesse infinie amont est prise égale à  $U_\infty = 4.71$  m/s et la vitesse de rotation égale à  $\omega = 300$  rot/min, ce qui correspond à un nombre de Reynolds (basé sur la corde) moyen sur un tour de  $3.8 \times 10^4$ . Le maillage structuré par blocs a été généré avec le préprocesseur Gambit du logiciel Fluent et divisé en 12 domaines. Chaque domaine est écrit séparément sur un fichier suivant le format Plot3D ASCII qui est reconnu par le solveur Turbflow. Le nombre total de cellules est de 141288, soit 12000 cellules par bloc en moyenne. Le diamètre du domaine de calcul est de 65 cordes. Le nombre de cellules selon la direction radiale, autour du profil, est de 375. Le maillage est présenté figure 4. Autour des pales, la finesse du maillage permet de décrire la sous-couche visqueuse, la première maille se situant vers  $y^+ = 1$  (25  $\mu\text{m}$ ). L'intensité turbulente a été fixée à 2%. Comme conditions aux limites en entrée on impose la vitesse infinie amont, en sortie la pression atmosphérique, sur l'extrados et l'intrados des pales une condition d'adhérence à la paroi. Pour décrire la rotation, Turbflow utilise une méthode ALE (Arbitrary Lagrange Euler).

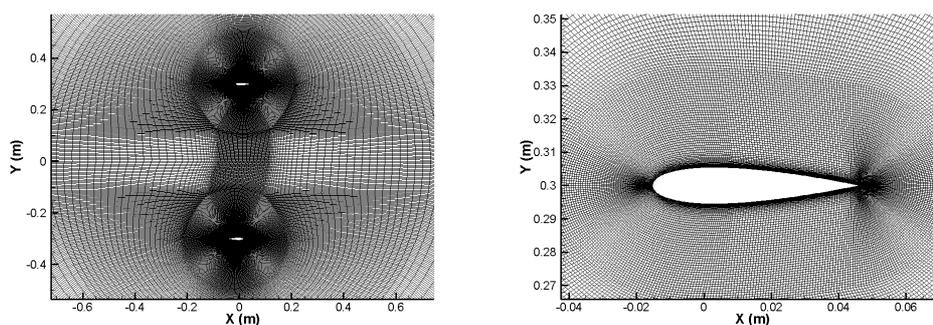


FIG. 4 – Le maillage dans la zone centrale de calcul (droite) et autour d'une pale (gauche)

Les équations qui gouvernent l'écoulement sont résolues en utilisant une formulation en volumes finies à l'aide d'un schéma décentré amont de Liou et du préconditionnement bas Mach de Jameson et Smith (1995). La solution, fonction du temps, est obtenue à l'aide de la technique du double pas de temps (Dual time Stepping). Afin d'accélérer la convergence on utilise un pas de temps local avec lissage des résidus. Le pas de temps physique choisi est de  $1.38 \cdot 10^{-4}$  s, ce qui correspond à  $0.25^\circ$  de rotation. Pour parcourir une corde, l'écoulement a besoin de 48 pas de temps.

Les simulations ont été faites sur une machine Dell équipée de 2 processeurs Intel Xeon double cœur à 3.2 GHz avec 8 Giga de mémoire vive. Afin d'éviter les phénomènes transitoires et les instabilités de calcul liées au démarrage du calcul et à chaque itération physique, une rampe linéaire du CFL allant de 0.001 à 1 pour les premières 300 sous-itérations a été introduite. Le temps de calcul pour une itération physique avec 2500 sous-itérations est constant pendant la rotation et il est d'environ 50 minutes. Pour un seul tour de la turbine, le temps de calcul est d'environ 50 jours. En fonction de la qualité des résultats obtenus, diverses optimisations des temps de calculs sont envisageables, en particulier les techniques de pas de temps adaptatifs. La mise en œuvre du calcul sur un plus grand nombre de processeur sera aussi nécessaire.

Les figures 5 à 8 représentent les lignes de courant dans un repère relatif pour les deux pales, amont (en haut) et aval (en bas). En arrière plan, la carte représente les iso-vorticité. Un premier tourbillon peu intense, noté m, apparaît pour un angle  $\theta=56^\circ$ . Il va s'éloigner rapidement de la pale. Cette structure n'est pas retrouvée sur l'expérience de Brochier *et al.*, (1986); on suppose qu'il s'agit d'un tourbillon de démarrage.

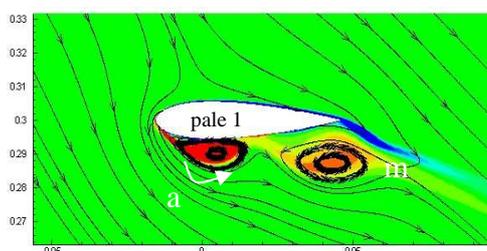


FIG. 5 – Lignes de courant dans le repère relative pour  $\theta = 62^\circ$  ( $\alpha = 19.7^\circ$ )

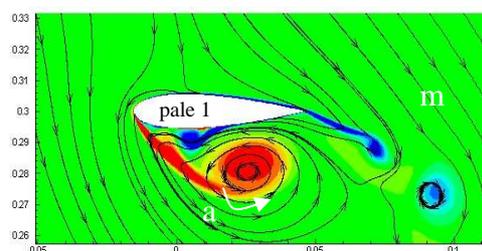


FIG. 6 - Lignes de courant dans le repère relative pour  $\theta = 77.25^\circ$  ( $\alpha = 23.7^\circ$ )

Vers  $q=62^\circ$ , un tourbillon, noté a, comme dans le papier de Brochier se développe au du bord d'attaque de la pale 1. Il tourne dans le sens antihoraire, en restant près de la pale et se détache vers  $q=77^\circ$  comme le montre la figure. Dans le même temps, la pale 2 voit un tourbillon c équivalent du a mais tournant en sens inverse. Conformément à l'expérience, il se développe puis se détache de la pale. Un peu plus tard, lorsque l'incidence relative est presque maximum ( $\alpha = 26^\circ$ ,  $q=90^\circ$ ), un autre tourbillon, noté b, apparaît, au bord de fuite. Il tourne dans le sens horaire, inverse du tourbillon a. la modélisation de ce tourbillon est cruciale car, situé sur le bord de fuite, il influence fortement la circulation et donc la portance. La pale 2 voit à l'identique un tourbillon de bord de fuite d de circulation opposée. Au cours de leur transport au sein de la turbine l'expérience montre que les couples de tourbillons contrarotatifs a et b d'une part et c et d d'autre part s'apparient. Le calcul en cours, n'est pas assez avancé pour le vérifier.

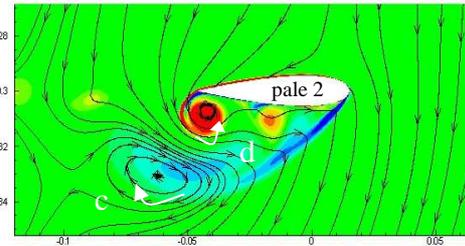
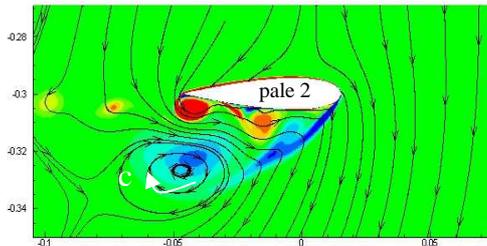
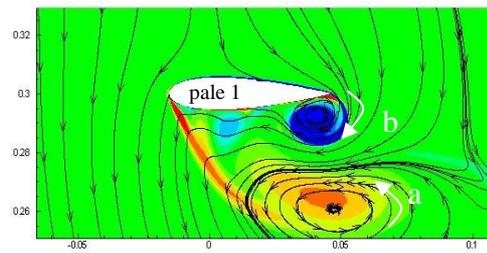
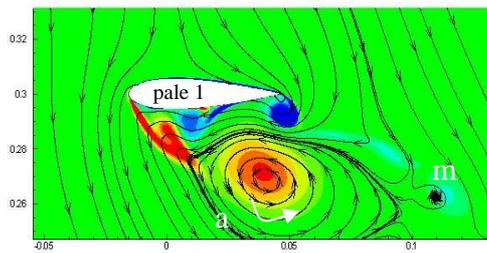


FIG. 7 - Lignes de courant dans le repère relative pour  $\theta = 87.75^\circ$  ( $\alpha = 26.3^\circ$ )

FIG. 8 - Lignes de courant dans le repère relative pour  $\theta = 92.75^\circ$  ( $\alpha = 27.1^\circ$ )

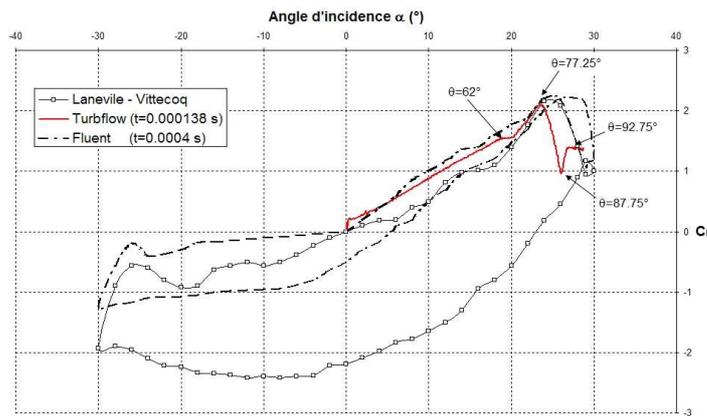


FIG. 9 – Variation du coefficient de portance avec l'incidence

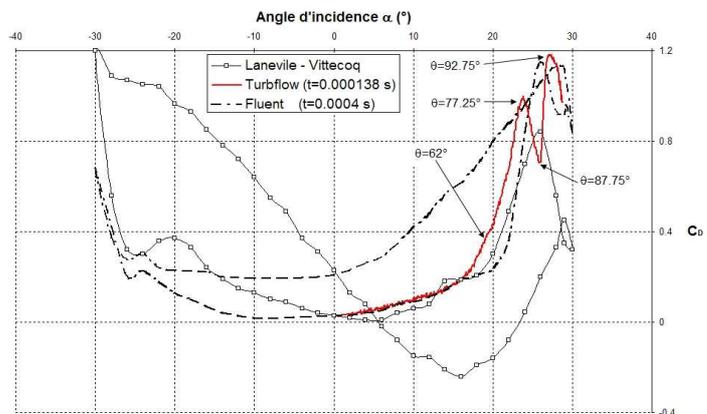


FIG. 10 – Variation du coefficient de traînée avec l'incidence

La portance augmente linéairement pour la zone d'écoulement non-décollé ( $0^\circ < \theta < 180^\circ$ ). Une première rupture de pente pour la portance se produit quand le tourbillon m se détache ( $\theta=62^\circ$ ) de la pale 1 mais comme il s'éloigne très vite de la pale, la portance ré-augmente linéairement jusqu'au moment du détachement du tourbillon a. ( $\theta=77^\circ$ ), quand la portance et la traînée chutent brusquement. Ce point correspond au point de décollement dynamique. L'apparition d'un deuxième tourbillon au bord de fuite ( $\theta=88^\circ$ ), va influencer la circulation autour du profile, en augmentant la portance, pour une courte période. Le calcul étant en cours, il est difficile de conclure si l'écoulement va se ré-attacher et les tourbillons lâchés vont être dissipés.

## 4 Conclusions

Le calcul de l'écoulement au sein d'une turbine Darrieus est effectué avec un code de calcul RANS disposant de schémas numériques peu dissipatifs. Les structures tourbillonnaires, caractérisant le fort décollement dynamique sur les deux pales modélisées, sont proches de celles visualisées lors des expériences de Brochier. En particulier, la paire de tourbillons contrarotatifs afférant à chacune des pales est bien retrouvée. La vorticité de ces structures est importante et semble perdurer lors du transport ce qui est conforme   la réalité. Le cycle d'hystérésis calculé présente des variations qui sont induites directement par la dynamique tourbillonnaire au voisinage de la pale. En particulier, le tourbillon a, provoque une perte de portance, comme dans un décollement statique, mais le tourbillon b empêche le recollement et donc la récupération de cette portance. Le calcul, toujours en cours, montre les prémices de ce phénomène. Une optimisation des temps de calcul devra être faite pour effectuer plusieurs tours et s'affranchir d'incertitudes liées au transitoire du démarrage.

## Références

- Brochier G., Frauni  P., B guier C., & Paraschivoiu I. 1986 Water Channel Experiments of Dynamic Stall on Darrieus Wind Turbine Blades. *Journal of propulsion*, **2**(5), 445-449
- Ira H. Abbott & Albert E. Von Doenhoff 1958 Theory of wing sections. Dover Publications, Inc.
- Laneville A. & Vittecoq P. 1986 Dynamic stall: The case of the vertical axis wind turbine. In *Journal of Solar Energy Engineering*, **108**, 140-145
- Ma tre T., Achard J.-L., Guittet L., Ploesteanu C. 2005 Marine turbine development: numerical and experimental investigations. Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, **50**(64), 59-66
- McCroskey W. J. 1981 The Phenomenon of Dynamic Stall (Lecture notes) Presented to Von K rman Institute Lecture Series, 9-13, Rhode-Saint-Gen se, Belgium
- Paraschivoiu I. 2002 Wind turbine design with emphasis on Darrieus concept. Polytechnic International Press, ISBN 2-553-00931-3
- Ploesteanu Cristina. 2004 Etude hydrodynamique d'un type d'hydrolienne   axe vertical pour les courants marins. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble
- Weiss Jonathan M. & Smith Wayne A. 1995 Preconditioning applied to variable and constant density flows. *AIAA Journal*, **33**(11)