



**HAL**  
open science

# Mesures PIV du champ de vitesse dans une hydrolienne tripale de type Darrieus : Comparaison avec les simulations numériques

Jonathan Bossard, Jean-Pierre Franc, Thierry Maître, Laure Vignal, P. Baele

## ► To cite this version:

Jonathan Bossard, Jean-Pierre Franc, Thierry Maître, Laure Vignal, P. Baele. Mesures PIV du champ de vitesse dans une hydrolienne tripale de type Darrieus : Comparaison avec les simulations numériques. Congrès Francophone de Techniques Laser, Sep 2010, Vandoeuvre-lès-Nancy, France. hal-01134279

**HAL Id: hal-01134279**

**<https://hal.science/hal-01134279>**

Submitted on 5 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Mesures PIV du champ de vitesse dans une hydrolienne tripale de type Darrieus – Comparaison avec les simulations numériques

J. Bossard, J.-P. Franc, T. Maître, L. Vignal, P. Baele  
Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI)  
CNRS – Grenoble-INP – UJF  
Domaine Universitaire  
BP 53  
38041 Grenoble Cedex 9  
Jonathan.Bossard@legi.grenoble-inp.fr

## Liste des notations

$c$	corde du profil	$y^+$	position de la sous couche laminaire
$D/R$	diamètre/rayon de la turbine	$\alpha$	angle d'incidence du fluide sur le profil
$h$	hauteur de la turbine	$\dot{\alpha}$	vitesse de variation de l'incidence
$k$	fréquence réduite : $c\dot{\alpha}_{max}/2\omega R\alpha_{max}$	$\theta$	position angulaire de la pale
$Re_c$	nombre de Reynolds de corde : $\omega Rc/\nu$	$\lambda$	paramètre d'avance : $\omega R/U_\infty$
$Re_D$	nombre de Reynolds de rotor : $U_\infty D/\nu$	$\omega$	vitesse de rotation de la turbine
$U_\infty$	vitesse de l'écoulement à l'amont de la turbine		

## 1 Introduction

Le projet HARVEST ("Hydroliennes à Axe de Rotation Vertical Stabilisé") initié en 2001 par le LEGI développe un concept d'hydroliennes à flux transverse et à axe vertical de type Darrieus (Cf. Figure 2) pour l'installation en mer ou en rivières. L'écoulement au sein de divers types d'hydroliennes a fait l'objet de simulations numériques récentes, 2D et 3D, sur la base d'un modèle RANS  $k-\omega$  SST [1]. En parallèle, des mesures de performances globales ont été réalisées dans le tunnel hydrodynamique du LEGI, ainsi que des mesures de champ de vitesse par PIV 2D. Le comportement global du modèle numérique a été validé par des mesures de couple instantané s'exerçant sur la génératrice [1]. Les mesures PIV qui font l'objet de la présente étude permettent d'obtenir des données expérimentales indispensables à la validation locale des écoulements, en particulier au voisinage des pales, lieu de naissance des structures tourbillonnaires caractéristiques du décrochage dynamique.

Le développement de zones dans lesquelles l'écoulement décolle des pales est une conséquence des fortes incidences qui peuvent apparaître au cours de la rotation. Le décrochage dynamique est caractérisé par un retard par rapport au cas statique entraînant des forces de portance et de traînée supérieures. Il est également caractérisé par un phénomène d'hystérésis conduisant à un écoulement différent selon que l'incidence du profil augmente ou diminue. Les premières études expérimentales de ce phénomène remontent aux années 1950 et trouvaient leur application avec les rotors d'hélicoptères. Ces études étaient généralement réalisées sur des profils oscillants afin de simplifier les conditions expérimentales par rapport à des rotors en soufflerie.

Le milieu des années 1980 voit l'apparition de nouvelles études expérimentales sur des turbines Darrieus (Cf. Tableau 1). Les premiers travaux ont été réalisés en 1986 par deux équipes : Laneville et Vittecoq [2] d'une part qui ont mesuré les cycles d'hystérésis de traînée et de portance pour une éolienne bipale à axe de rotation vertical ; Brochier et al. [3] d'autre part qui ont mesuré des profils de vitesse par LDV et ont visualisé l'écoulement par des techniques de bulles d'hydrogènes et d'injection de colorants au niveau d'une turbine Darrieus dans un tunnel hydrodynamique. Les progrès de la PIV ces dernières années, tant en ce qui concerne les évolutions technologiques que les améliorations des algorithmes de calculs, permettent aujourd'hui d'obtenir des champs de vitesse globaux et instantanés avec une précision très satisfaisante. Deux études portant sur la caractérisation du décrochage dynamique dans une turbine à axe

vertical à l'aide de mesures PIV ont été réalisées : les pionniers sont les japonais Fujisawa et al. [4] qui ont réalisé des mesures PIV sur une turbine Darrieus monopale en 2001. Ils décrivent précisément le phénomène de lâché de tourbillon pour un nombre de Reynolds relativement faible, de l'ordre de 3000. La seconde étude date de 2009 et a été réalisée par Simão Ferreira et al. [5] de l'université de Delft. Les essais, réalisés dans une soufflerie avec des nombres de Reynolds de l'ordre de 50 000 sont comparés à des résultats numériques.

L'étude présentée ci-après s'inscrit dans cette lignée d'études, mettant à profit les avantages de la PIV pour mieux comprendre les phénomènes tourbillonnaires dans les turbines et comparer les résultats expérimentaux aux codes numériques. Le Tableau 1 montre que les valeurs du paramètre d'avance et de la fréquence réduite retenues pour cette étude sont voisines des valeurs généralement considérées dans la littérature. Le nombre de Reynolds apparaît par contre légèrement plus élevé.

Tableau 1 : Etudes expérimentales sur le décrochage dynamique dans les turbines Darrieus

Paramètres	Laneville (1986) [2]	Brochier (1986) [3]	Fujisawa (2001) [4]	Ferreira (2009) [5]	HARVEST (2010)
Diamètre	0.6m	0.12m	0.060m	0.4m	0.175m
Profil	NACA 0018	NACA 0018	NACA 0018	NACA 0015	NACA 0018
Corde	0.061m	0.02m	0.010m	0.05m	0.032m
Fluide	air	eau	eau	air	eau
Reynolds	$Re_c=3.8.10^4$	$Re_D=10^4$	$Re_D=3.10^3$	$Re_c=5.10^4 / 7.10^4$	$Re_c=1.8.10^5$
$\lambda^1$	2 2.5 3 4 5	2.14 3.85	1 2 3	2 3 4	2
$k^2$	0.19 0.16 0.15 0.13 0.13	0.30 0.22	$\infty$ 0.32 0.25	0.24 0.18 0.16	0.30
Type d'étude	Mesure de cycles d'hystérésis trainée / portance	LDV + visualisation écoulement	PIV	PIV + comparaison numérique	PIV + comparaison numérique

## 2 Description des moyens d'essai

### 2.1 Tunnel hydrodynamique

Le tunnel hydrodynamique du LEGI permet de tester des maquettes d'hydroliennes de dimensions 175 x 175mm (Dxh). La veine d'essais (Cf. Figure 1), de section rectangulaire et de dimensions 250 x 700 x 1000 mm (hauteur x largeur x longueur) est constituée d'une armature métallique sur laquelle sont fixés des hublots en plexiglas (ALTUGLAS) sur les côtés latéraux et inférieurs. Le système de pilotage de l'hydrolienne et l'instrumentation sont solidaires de la face supérieure. Un convergent et un nid d'abeille situés en amont permettent de stabiliser l'écoulement à l'entrée de la veine.

Un groupe motopompe assure la circulation du fluide et permet d'atteindre des débits allant jusqu'à  $500l.s^{-1}$ , soit une vitesse de  $2.8m.s^{-1}$ , i.e. l'ordre de grandeur des courants fluviaux dans lesquels les hydroliennes seront installées.

<sup>1</sup> Le paramètre d'avance, également appelé vitesse spécifique, noté  $\lambda$  est le rapport entre la vitesse périphérique de rotation et la vitesse de l'écoulement à l'amont :  $\lambda = \frac{\omega \cdot R}{U_\infty}$ .

<sup>2</sup> La fréquence réduite notée  $k$  est le rapport entre une échelle de temps caractéristique de convection ( $c/\omega R$ ) et une échelle de temps caractéristique du mouvement du profil ( $2\alpha_{max}/\dot{\alpha}_{max}$ )

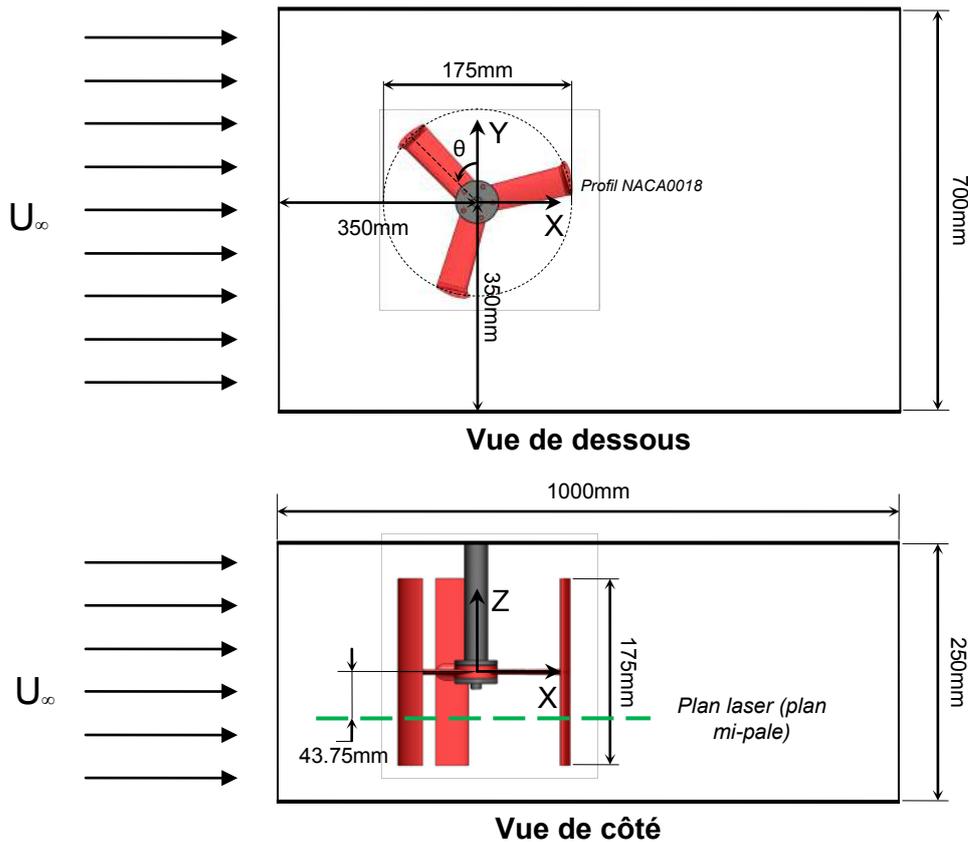


Figure 1 : Caractéristiques de la veine d'essais

## 2.2 Dispositif PIV

Les mesures ont été réalisées sur un modèle réduit de turbine tripale à pales droites (Cf. Figure 1). Le profil de la pale est un NACA 0018 projeté sur le cercle de rotation, de longueur de corde 32.08mm. Les mesures ont été réalisées dans la partie amont de la machine pour différentes positions angulaires (de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  par pas de  $10^\circ$ ), dans le plan mi-pale inférieur situé au milieu entre le bras de raccordement et l'extrémité de la pale (Cf. Figure 2). La vitesse de l'écoulement est fixée à  $2.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , vitesse maximale dans la veine, et la vitesse de rotation de la turbine est de  $611\text{tours}\cdot\text{min}^{-1}$ , correspondant à un paramètre d'avance  $\lambda$  de 2, conduisant au rendement maximum de la turbine d'après les mesures de performances réalisées antérieurement. La Figure 3 montre une photographie du dispositif de mesure PIV prise lors de l'installation de la mire d'étalonnage. Le laser utilisé est un Nd-YAG impulsionnel bi-cavité délivrant  $2 \times 30\text{mJ}$  à  $532\text{nm}$ . Un bras optique permet d'acheminer le faisceau vers le générateur de nappe laser situé à hauteur du plan de mesure. La caméra CCD positionnée sous la veine est une ImagerProX2M de résolution  $1600 \times 1200$  pixels possédant un capteur de  $12.2 \times 9\text{mm}$ . Les particules utilisées pour ensemencher l'écoulement sont des billes de verre creuses argentées de  $10\mu\text{m}$  de diamètre moyen. Afin d'éviter les réflexions sur les pales, l'hydrolienne est recouverte d'une peinture à base de rhodamine 6G (pic d'absorption à environ  $530\text{nm}$  et d'émission à environ  $560\text{nm}$  [6]) et un filtre passe-bande  $532 \pm 10\text{nm}$  est monté sur la caméra CCD.

Un système de synchronisation entre l'acquisition et la position de l'hydrolienne est mis en place afin de pouvoir réaliser plusieurs prises d'images dans une même position angulaire. 3000 acquisitions par position sont ainsi réalisées de façon à obtenir un champ moyenné. Les acquisitions sont faites sur une vue resserrée de la pale afin de capturer au mieux le tourbillon de décrochage dynamique (la taille de fenêtre étant d'environ  $16\text{cm} \times 12\text{cm}$  autour de la pale de dimension  $3.2\text{cm}$ ), et sont traitées avec le logiciel DaVis 7.2 de LaVision. Avant le calcul, les images subissent un traitement afin de limiter au maximum le bruit de mesure : pour chaque position, le minimum d'intensité de chaque pixel sur les 3000 images est calculé puis soustrait à chaque image. L'ombre induite par la pale est prise en compte par la création d'un masque qui

empêche tout calcul dans cette zone. Chaque doublet est ensuite traité par intercorrélation suivant un processus multi-passes avec déplacement et déformation des mailles, les fenêtres d'interrogation se raffinant de  $128 \times 128$  pixels jusqu'à  $8 \times 8$  pixels sans recouvrement.

### 3 Modèle numérique

Le modèle numérique utilisé est l'aboutissement des travaux de Amet [1] et Zanette (thèse actuellement en cours de soumission). Il consiste en une représentation 3D de la veine d'essai et est basé sur un modèle turbulent RANS  $k-\omega$  SST. Le mouvement de rotation de l'hydrolienne nécessite l'utilisation d'un maillage tournant dont l'interface circulaire entre la partie mobile comprenant l'hydrolienne et la partie fixe se situe à un rayon de 350mm (soit deux diamètres). Le maillage de couche limite sur les pales, les bras de raccordement et l'arbre est un maillage structuré composé d'hexaèdres réguliers. La première maille se situe à une distance de  $5 \cdot 10^{-3}$  mm (soit  $y^+ \approx 1$ ). Le reste du domaine de calcul est maillé par des éléments tétraédriques. Le maillage est constitué d'approximativement  $10^7$  mailles.

Les paramètres de l'écoulement pour le calcul sont les mêmes que dans les conditions expérimentales, i.e. une vitesse amont de  $2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et un paramètre d'avance  $\lambda=2$ . Les données dans le plan mi-pale sont ensuite extraites du calcul 3D en réalisant une coupe et comparées aux valeurs mesurées.

## 4 Résultats

### 4.1 Comparaison des mesures expérimentales et des simulations numériques

Les Figure 4 et Figure 5 présentent les champs de vorticités et de vitesse relative issus des mesures PIV et des simulations numériques pour trois positions caractéristiques du processus de formation du tourbillon de décrochage dynamique. A  $\theta=20^\circ$ , l'angle d'incidence de la pale est faible, l'écoulement est encore entièrement attaché et les champs de vitesse sont relativement similaires.

Les similarités se dégradent progressivement au cours de la rotation. Les champs de vorticités PIV montrent l'apparition d'une zone de vorticités importante à l'avant du bord d'attaque à partir de  $\theta=30^\circ$ . Cette zone bien visible sur la Figure 4 à  $100^\circ$  va persister jusqu'à  $130^\circ$  et n'est pas présente dans les résultats numériques. Il est envisageable que ce tourbillon ne soit pas le tourbillon de décrochage dynamique car aucune référence bibliographique ne fait état d'un tel phénomène, mais peut-être un phénomène dû à des effets laminaires, ainsi qu'à la courbure inverse du profil. Il est également envisageable qu'il soit le résultat d'erreurs de mesure par PIV. Pour l'instant, les résultats à disposition ne permettent pas de comprendre précisément ce phénomène qui fera l'objet d'investigations futures sur la base de nouvelles campagnes de mesures PIV 2D et Stéréo PIV (2D-3C). Cette différence se retrouve logiquement sur les champs de vitesses. En effet, la topologie du champ de vitesse est différente entre les résultats expérimentaux et numériques : une zone de survitesse se développe au bord d'attaque en numérique alors que les résultats PIV situent cette zone plus en arrière du profil. De plus, les valeurs des vitesses maximales diffèrent également :  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  en PIV contre  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  en numérique pour  $\theta=100^\circ$ .

Les champs de vorticités pour  $\theta=180^\circ$  mettent en évidence une autre différence : le tourbillon de décrochage dynamique capté par les mesures PIV se situe au-delà du bord de fuite alors que les simulations numériques le localise au milieu du profil. Ainsi, les simulations numériques semblent introduire un retard par rapport aux mesures expérimentales. Une autre différence concernant les niveaux de vorticités est également observée. En effet, si les résultats PIV montrent un niveau de vorticités maximum proche de  $530 \text{ s}^{-1}$ , les simulations l'estiment quant à elles autour de  $1150 \text{ s}^{-1}$ .

La Figure 6 présente une superposition des lignes de courant et du champ de vorticités pour deux positions différentes de l'hydrolienne caractéristiques de la formation du tourbillon en avant du profil. A  $30^\circ$ , la zone de vorticités commence à apparaître alors qu'à  $60^\circ$  elle est bien formée. L'analyse des lignes de courant révèle que l'attaque du fluide sur le profil est beaucoup moins marquée dans les résultats PIV que dans les simulations numériques. En effet, l'inflexion des

lignes de courant due au contournement du profil intervient beaucoup plus proche du bord d'attaque dans les simulations numériques.

Des différences importantes sont donc mises en évidence entre simulations et mesures PIV. En résumé, les simulations conduisent à un retard de plusieurs dizaines de degrés dans le développement du tourbillon, les niveaux de vorticités en numérique sont sensiblement plus élevés que ceux mesurés par PIV et un tourbillon situé au bord d'attaque est observé sur les mesures PIV.

#### **4.2 Analyse des différences observées entre les résultats PIV et les simulations numériques**

Les différences observées entre expériences et simulations peuvent provenir de nombreux facteurs, aussi bien des facteurs numériques qu'expérimentaux. Cette partie s'attache ainsi à dresser une liste des différentes sources pouvant causer ces différences.

Tout d'abord, il est vraisemblable que le modèle turbulent adopté ici pour les simulations ne soit pas en mesure de décrire correctement le bulbe de décollement laminaire apparaissant au bord d'attaque et très vraisemblablement à l'origine du tourbillon de décrochage dynamique. En effet, le nombre de Reynolds modéré considéré dans l'expérience laisse penser que l'écoulement n'est pas entièrement turbulent. L'hypothèse d'une turbulence développée faite dans les modèles numériques et l'absence de modélisation de la transition laminaire-turbulent semblent stabiliser de façon excessive la couche limite qui résisterait mieux au gradient adverse de pression ce qui expliquerait que le tourbillon se décroche plus tardivement.

Cette différence peut éventuellement être due aux paramètres d'entrée du modèle de turbulence. Par exemple, l'intensité turbulente dans les simulations est arbitrairement fixée à 3%. Or, des mesures réalisées par une technique de film chaud en 1990 [7] sur le tunnel hydrodynamique du LEGI mais dans une veine différente ont mis en évidence un taux de turbulence de l'ordre de 0.12-0.16%. Le taux de turbulence est par ailleurs un facteur influençant le décrochage dynamique. Ainsi, une turbulence très développée aura tendance à stabiliser la couche limite et à retarder le processus de développement du décrochage dynamique.

Au-delà d'une mauvaise description de la transition laminaire-turbulent dans les simulations, il convient de remarquer que les mesures PIV peuvent être entachées d'erreurs et d'imprécisions dues aux facteurs suivants : la résolution des mesures PIV, la composante de vitesse normale au plan de mesure, la non reproductibilité des tourbillons, les gradients de vitesse.

Les mailles utilisées lors du traitement PIV sont des mailles carrées de 8 x 8 pixels, correspondant à une zone d'interrogation dans l'espace physique d'environ 560 $\mu$ m. Ainsi, cette résolution ne permet pas de décrire correctement les petites structures intervenant dans la zone proche paroi.

Dans des écoulements possédant une forte composante de vitesse normale au plan de mesure, une erreur de perspective non négligeable apparaît (Cf. Prasad et Adrian [8]). L'écoulement dans l'hydrolienne est soumis à des effets 3D très importants. Les simulations numériques montrent pour certaines positions, le rapport entre vitesse normale et vitesse dans le plan de mesure peut atteindre 40%, entraînant des erreurs non négligeables dans les mesures PIV. Une étude menée en 2002 par Yoon et Lee [9], met à profit les avantages de la Stéréo PIV qui permet de s'affranchir des erreurs de perspective. Ils comparent les résultats de PIV 2D et de PIV 2D-3C dans une turbine à flux axial et concluent que les zones où l'écoulement est fortement tridimensionnel introduisent une erreur de perspective d'environ 20.8% par rapport à la vitesse locale de l'écoulement.

Le phénomène de décrochage dynamique est connu pour être très sensible aux conditions aux limites (Cf. Wernert et al. [10] par exemple), comme la vitesse à l'amont ou des effets de vibrations des pales. Les conditions de déclenchement du décrochage dynamique peuvent en effet varier de façon non négligeable d'une rotation à une autre. Par conséquent, le tourbillon de décrochage dynamique peut se situer à des endroits légèrement différents d'une acquisition à une autre. La moyenne de phase réalisée sur tous les champs instantanés a donc pour conséquence de sous-estimer le niveau de vorticités réel. Une étude sur les champs PIV instantanés a confirmé cette hypothèse. Les niveaux de vorticités à 180° sont compris entre 550s<sup>-1</sup> et 950s<sup>-1</sup> alors que la vorticités du champ moyenné est d'environ 530s<sup>-1</sup>. Cette différence, même entre les champs instantanés,

dénote bien le caractère fluctuant du décrochage dynamique. Un traitement des données PIV qui introduirait une procédure de repérage du tourbillon avant tout moyennage devrait permettre de limiter cet effet et devrait conduire à une estimation plus fiable du niveau de vorticité attaché au décrochage dynamique.

En présence de forts gradients de vitesses comme c'est le cas ici, des erreurs importantes peuvent apparaître. Même si l'algorithme de déformation de maille permet de limiter ces erreurs, les zones de forts gradients présentes dans l'écoulement autour des pales et inhérentes au phénomène de décrochage dynamique peuvent introduire une erreur non négligeable dans les mesures PIV.

## 5 Bilan et Perspectives

Cette étude s'est attachée à analyser le processus de décrochage dynamique à partir de mesures PIV et à le comparer aux simulations numériques 3D menées en parallèle. Des différences importantes ont été mises en évidence, comme le retard des simulations numériques dans la description du développement et du lâcher tourbillonnaire, et des niveaux de vorticité issus des calculs beaucoup plus élevés.

Ces différences peuvent avoir diverses origines qui ont été inventoriées dans cette communication. Du point de vue simulation, le modèle de turbulence développée adopté ici ne rend probablement pas compte de manière satisfaisante des effets laminaires ou de transition présents aux nombres de Reynolds relativement limités, de l'ordre de 200 000, obtenus dans cette application. Du point de vue de la mesure, la forte sensibilité du déclenchement du décrochage à divers paramètres difficilement contrôlables (tels que les vibrations éventuelles des pales ou les conditions générales d'écoulement à petite échelle) semble nécessiter de mettre en œuvre une procédure de moyennage plus fine que la simple moyenne de phase adoptée ici.

Diverses améliorations, aussi bien au niveau de l'acquisition qu'au niveau du traitement des images PIV, seront donc apportées pour les prochaines campagnes de mesures afin d'améliorer la définition du champ de vitesses et ainsi mieux capter le tourbillon de décrochage dynamique.

## 6 Références

- [1] Amet E. (2009), "Simulation numérique d'une hydrolienne à axe vertical de type Darrieus", **thèse de Grenoble-INP**.
- [2] Laneville A., Vittecoq P. (1986), "Dynamic Stall: the case of the vertical axis wind turbine", **Journal of Solar Energy Engineering**, **108**, 140-145.
- [3] Brochier G. et al. (1986), "Water channel experiments of Dynamic stall on Darrieus wind turbine blades", **Journal of Propulsion and Power**, **2(5)**, 445-449.
- [4] Fujisawa N., Shibuya S. (2001), "Observations of dynamic stall on Darrieus wind turbine blades", **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, **89**, 201-214.
- [5] Simão Ferreira C. (2009), "The near wake of the VAWT 2D and 3D views of the VAWT aerodynamics" **PhD Thesis, Delft University**.
- [6] Site internet de l'Oregon Medical Laser Center, consulté le 10/06/10 à 10h20, "<http://omlc.ogi.edu/spectra/PhotochemCAD/html/rhodamine6G.html>".
- [7] Briançon-Marjollet L., Michel J. M. (1990), "The Hydrodynamic Tunnel of I.M.G. : Former and Recent Equipments", **Journal of Fluids Engineering**, **112**, 338-342
- [8] Prasad A.K., Adrian R.J (1993), "Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows", **Experiments in Fluids**, **15**, 49-60.
- [9] Yoon J.H., Lee S.J (2002), "Direct comparison of 2D PIV and stereoscopic PIV measurements", **Measurement Science and Technology**, **13**, 1631-1642.
- [10] Wernert P. et al. (1997), "Demonstration by PIV of the Non-Reproducibility of the Flow Field Around an Airfoil Pitching Under Deep Dynamic Stall Conditions and Consequences", **Aerospace Science and Technology**, **2**, 125-135.



Figure 2 : Modèle réduit de turbine de type Darrieus.

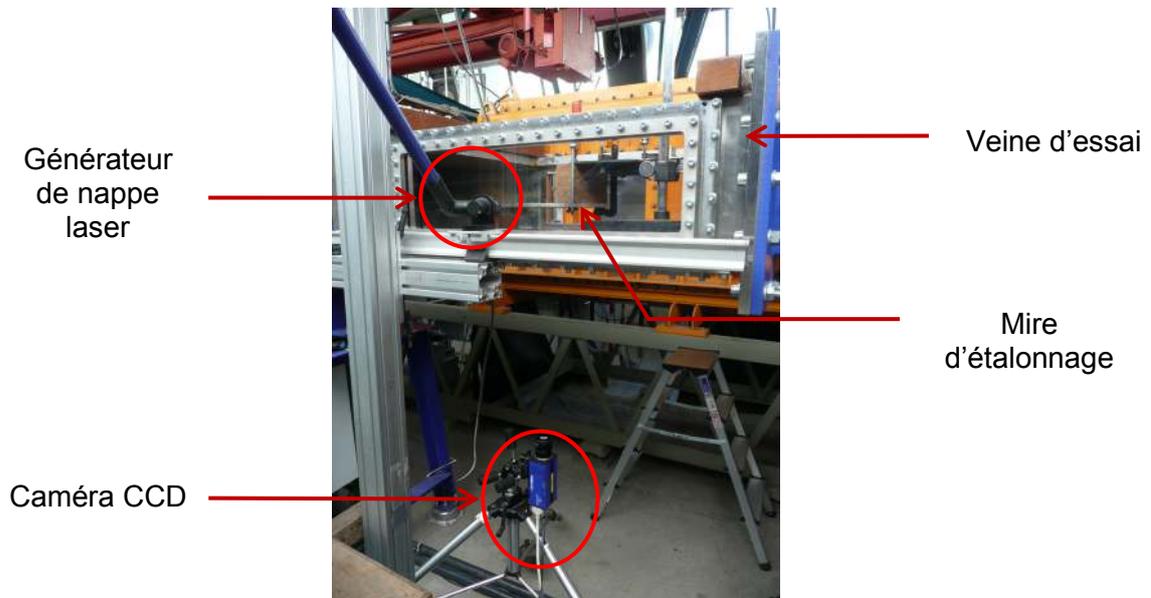


Figure 3 : Dispositif de mesure PIV. Photographie réalisée lors de la mise en place de la mire d'étalonnage.

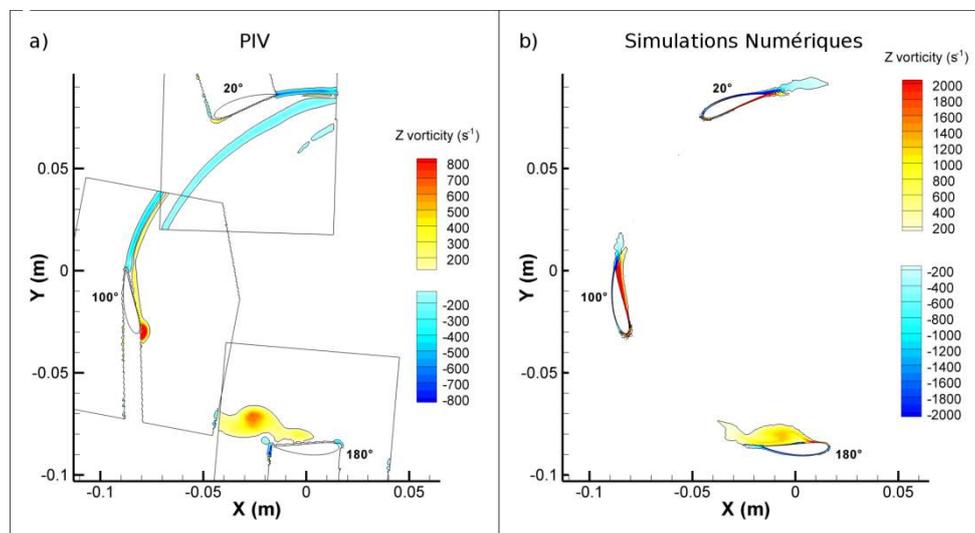


Figure 4 : Comparaison des champs de vorticité issus des mesures PIV (a) et des simulations numériques (b). Le rectangle entourant chaque position de a) correspond au domaine de mesure.

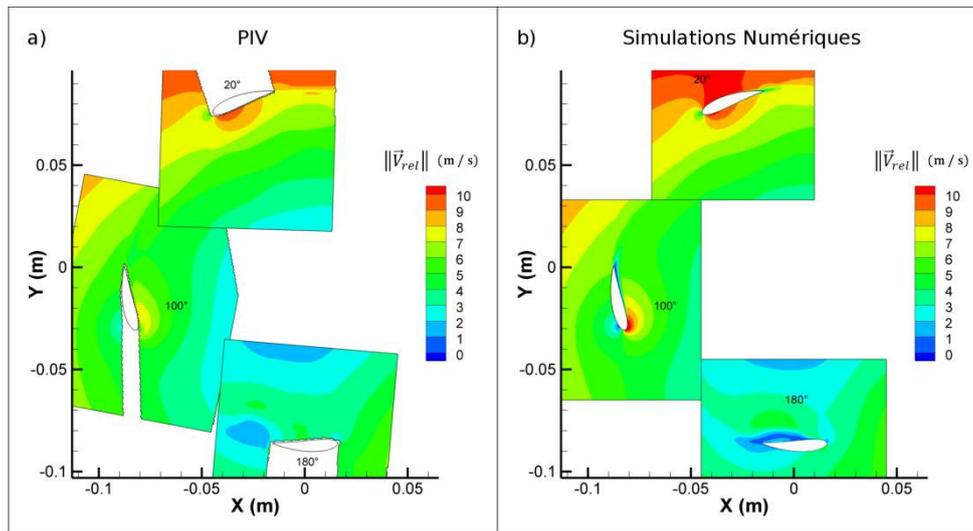


Figure 5 : Comparaison des champs de vitesse relative issus des mesures PIV (a) et des simulations numériques (b). La vitesse relative est donnée par la relation suivante :

$$\vec{V}_{rel} = \vec{V}_{abs} - \vec{\omega} \wedge \vec{r}$$

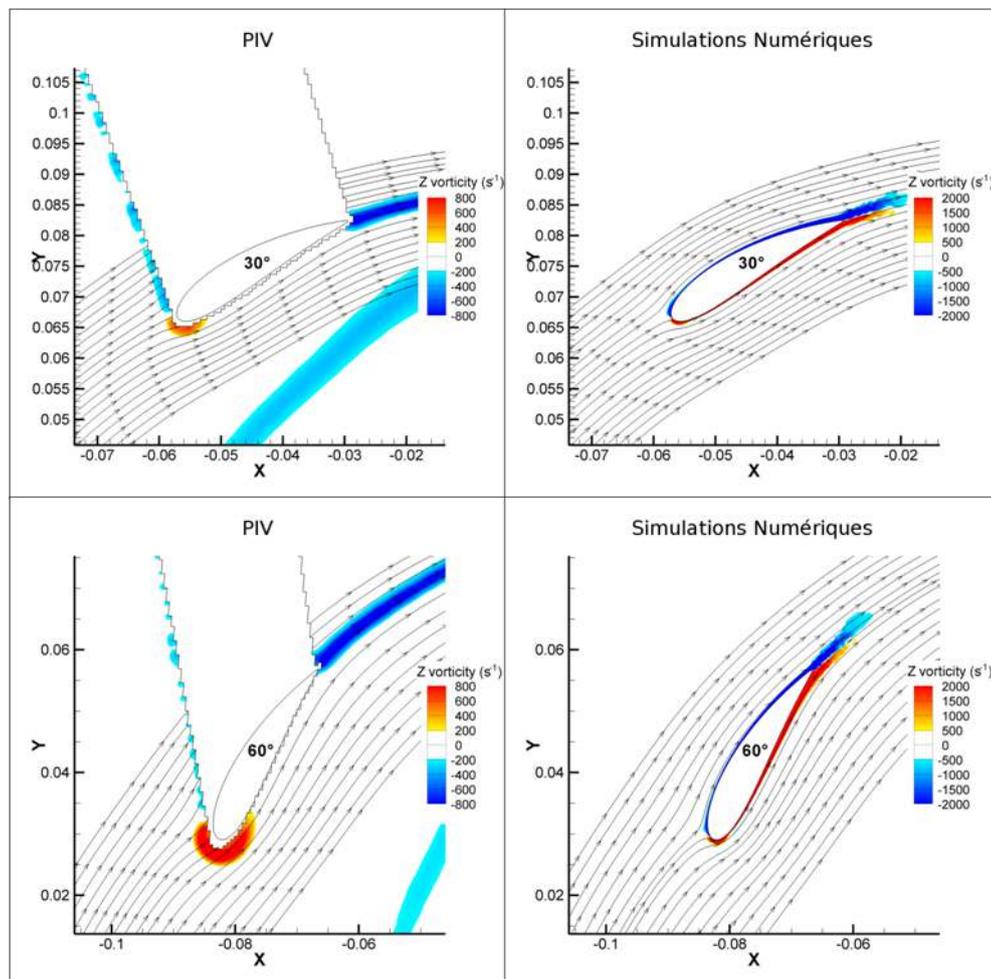


Figure 6 : Champs de vorticité et lignes de courant en vitesse relative. A gauche, résultats issus des mesures PIV. A droite, résultats issus des simulations numériques.