

10<sup>èmes</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

Nantes, 7, 8 et 9 mars 2005

**DEVELOPPEMENT ET APPLICATION D'UN NOUVEAU  
SYSTEME DE PIV TRI-COMPOSANTES (PIV-3C) ADAPTE AUX  
ESSAIS EN BASSIN DE TRACTION**

***DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A NEW THREE  
COMPONENTS PIV SYSTEM (3C-PIV) DESIGNED FOR TOWING TANK  
TESTS***

**J.DAUTEL\*, D.MARTIGNY\*, Ph.CORRIGNAN\*, J. TUKKER\*\***

\* SIREHNA - 1 rue de la Noë, BP 42105, 44321 NANTES CEDEX 3 – FRANCE  
e-mail: sirehna@sirehna.ec-nantes.fr, <http://www.sirehna.com>

\*\* MARIN - 2 Haagsteeg, PO Box 28, 6700 AA WAGENINGEN – PAYS-BAS  
e-mail: j.tukker@marin.nl, <http://www.marin.nl>

**Résumé**

L'obtention de données expérimentales fines représente un besoin constant pour la validation des codes de simulation CFD. Les méthodes expérimentales actuellement utilisées en bassin hydrodynamique pour la mesure de champs de vitesse tridimensionnels sont généralement intrusives (sonde Pitot, moulinets, fils chauds) et/ou lourdes de mise en œuvre (Vélocimétrie Laser Doppler). La méthode de mesure par imagerie de particules (PIV – Particle Image Velocimetry) est à ce niveau très intéressante, étant non intrusive et délivrant des données dans un plan à chaque mesure. Des systèmes de PIV bi-composantes, fournissant les composantes de vitesse d'écoulement dans le plan de mesure, existent, et commencent à être utilisés en bassin. Le champ d'application de ces systèmes reste cependant très limité. En effet, ils ne peuvent fonctionner en présence d'écoulements tridimensionnels, écoulements généralement rencontrés en bassin (par nature, par exemple derrière des hélices, ou du fait de la vitesse d'avance du modèle). Dans ce contexte, SIREHNA vient de faire l'acquisition d'un nouveau système de PIV tri-composantes, spécifiquement adapté aux besoins des essais en bassin. Ce système est robuste, mobile et adapté à des essais de recherche et industriels.

La présente communication décrit ce nouveau moyen de mesure ainsi que des exemples de mesures obtenues lors d'essais réalisés pour le centre technique hollandais MARIN dans le cadre du projet européen « Leading Edge ».

**Summary**

The collection of fine experimental data is a constant need for the validation of CFD codes. The experimental techniques currently applied in hydrodynamic test facilities for the measurement of 3D velocity fields are generally intrusive (Pitot tube, propeller-type flow meter, hot wires) and/or time and resource consuming (Laser Doppler Velocimetry). In this context, the Particle Image Velocimetry (PIV) is very interesting since it is non intrusive and it delivers data over a plane at each measurement. Two components PIV systems, delivering the two in-plane velocity components, already exist and start to be used in basins. However, their range of application remains limited. They cannot operate correctly in tri-dimensional

flows, which are generally encountered in basins (by nature, such as behind propellers, or because of the forward speed of the model). In this context, SIREHNA just acquired a new three components PIV (3C-PIV) system, specifically designed for tests in hydrodynamic basins. This system is rugged, mobile and adapted to research and industrial tests.

The present paper describes this new measurement system and presents examples of measurements collected during tests performed for the Maritime Research Institute of Netherlands (MARIN) in the frame of the “Leading Edge” EU project.

## **1. INTRODUCTION**

La conception des navires ou des structures offshore repose de plus en plus sur l'utilisation d'outils numériques sophistiqués ce qui rend primordiale la collecte de données expérimentales fines pour la validation de ces outils. Les méthodes expérimentales utilisées actuellement en bassin de traction, ou plus généralement dans les moyens d'essais hydrodynamiques, pour la mesure de champs de vitesse dans des écoulements autour de la carène, d'appendices de coque et au niveau du système propulsif, sont souvent intrusives (à l'exception de l'Anémométrie Doppler Laser – LDA qui reste délicate et lourde de mise en œuvre notamment lorsqu'il est nécessaire d'obtenir les trois composantes de la vitesse) et ponctuelles ce qui nécessite de multiplier les passages pour obtenir une carte de vitesse et ne permet pas d'effectuer des corrélations spatiales.

La méthode de Vélocimétrie par Imagerie de Particule (PIV – Particle Image Velocimetry) apparaît très avantageuse pour ces applications. Des systèmes de PIV bi-composantes (PIV-2C) sont d'ores et déjà utilisés dans quelques moyens hydrodynamiques mais leur champ d'application est limité lorsque les écoulements étudiés sont tridimensionnels, en particulier pour les applications embarquées sur un chariot de remorquage pour lesquelles la vitesse d'avance induit une composante importante de vitesse perpendiculaire aux plans de mesure transversaux. De plus, les systèmes de mesures doivent être économiquement efficaces, c'est-à-dire robustes et suffisamment souples et rapides d'installation et de mise en œuvre pour limiter l'immobilisation des moyens d'essais.

Dans ce contexte, SIREHNA a fait l'acquisition, auprès de la société Dantec Dynamics, d'un nouveau système de PIV-3C spécifiquement conçu pour les bassins de traction (mais également utilisable dans tout autre moyen d'essai hydrodynamique ou aérodynamique), avec le support et sur la base de spécifications établies conjointement avec le Maritime Research Institute of Netherlands (MARIN). Ce système peut être remorqué avec le modèle de navire pour mesurer les écoulements dans des plans fixes par rapport au modèle ou être utilisé au point fixe. Il est adapté à des essais de recherche et industriels et est mobile, pouvant être mis en œuvre par SIREHNA sur tout site d'essais.

Le système a, pour la première fois, été mis en œuvre pour MARIN dans le bassin dépressurisé de EDE, lors de deux campagnes d'essais réalisées par MARIN en juin et septembre 2004 dans le cadre du projet européen « Leading Edge » (EC GROWTH GRD2-2002-50105). Cette application visait à détecter les tourbillons d'extrémité de pales d'hélices.

## **2. DESCRIPTION DU SYSTEME**

### **2.1. PRINCIPE DE MESURE**

Le principe de la méthode PIV est de visualiser le déplacement  $\Delta X$  de particules dans l'écoulement qui sont illuminées très brièvement deux fois de suite avec un intervalle de temps  $\Delta t$ . La vitesse des particules, dans le plan lumineux, peut alors être obtenue par  $V = \Delta X / \Delta t$ . La troisième composante (perpendiculaire au plan lumineux) est obtenue en utilisant un principe stéréoscopique à l'aide de deux caméras visant une zone de mesure commune (cf. Figure 1).

Les particules sont illuminées à l'aide d'un plan laser stroboscopique, généré par un laser double cavité pulsé et une lentille divergente. Des images sont enregistrées à l'aide de deux caméras numériques synchronisées avec les impulsions laser. On obtient ainsi, pour chaque caméra, une série de paires d'images, chaque paire correspondant à deux pulses

consécutifs. Les paires d'images sont ensuite divisées en zones d'analyses (zones d'interrogation) qui, pixel par pixel, sont inter-corrélées entre elles (cf. Figure 1). La corrélation génère des pics dont le maximum identifie, dans la zone d'interrogation, le déplacement commun aux particules visibles dans cette zone. La détermination de ce pic est affinée par une interpolation sub-pixel. Des cartes de vitesse bi-composantes sont alors obtenues et des fonctions de validation sont utilisées pour supprimer les vecteurs aberrants.

La dernière étape consiste à déterminer la composante de vitesse perpendiculaire au plan lumineux. On combine pour cela les cartes de vitesse bi-composantes obtenues sur chacune des caméras au même instant en utilisant une matrice d'étalonnage déterminée par un étalonnage préalable.

En effectuant des mesures dans une succession de plans parallèles suffisamment proches par rapport aux échelles des phénomènes étudiés, et en utilisant des outils d'exploitation appropriés, ce système peut fournir une discrétisation tridimensionnelle du champ de vitesse.

## **2.2. COMPOSANTS DU SYSTEME**

Ce nouveau système de PIV-3C est :

- Adapté aux mesures embarquées : tous les composants immergés sont carénés, des interfaces mécaniques sont disponibles, et modifiables, afin de monter le système sur un chariot de remorquage et les équipements électroniques sont déportés.
- Robuste : la conception du système et le choix des équipements (en particulier du laser) ont été effectués dans l'optique d'utilisation en milieu industriel.
- Modulaire, avec de nombreuses possibilités d'orientation du plan laser et de prises de vues.
- Mobile : le système est entièrement démontable, transportable dans des caisses adaptées et est opéré par des opérateurs mobiles.

Les principaux composants du système sont décrits dans les paragraphes suivants.

### **2.2.1. Sonde caméra**

La sonde caméra est composée de deux modules caméras étanches et de deux modules miroirs. Les axes des caméras sont alignés avec l'axe de la sonde, et les directions de visée des caméras sont réglées à l'aide de miroirs de renvoi.

Les réglages de focalisation et d'ouverture des caméras sont pilotables à distance depuis l'unité centrale du système (ou depuis tout autre PC déporté).

Le réglage de l'angle de Scheimpflug est accessible pour chaque caméra depuis l'extérieur de la sonde à l'aide d'une mollette de réglage. Ce réglage consiste à incliner l'axe optique de la caméra par rapport à celui de l'objectif. Il est nécessaire lorsque le plan de la scène n'est pas perpendiculaire à l'axe optique de la caméra, ce qui est forcément le cas en vision stéréoscopique, afin de permettre une focalisation correcte de l'image sur le capteur de la caméra et ainsi permettre le réglage de la netteté sur toute l'image.

Deux caméras FlowSense 2M à capteur CCD de 1600x1200 pixels, de résolution 10 bits et de haute sensibilité sont utilisées. Des filtres interférentiels permettent de réduire l'influence de l'éclairage ambiant. Ces caméras permettent d'atteindre une cadence d'enregistrement des paires d'images de 15 Hz.

La sonde caméra est reliée au chariot de remorquage par l'intermédiaire d'un mât. La connectique est également remontée à la surface, depuis les modules caméras, dans des tuyaux étanches. L'ensemble mât support et tuyaux étanches est recouvert par un carénage hydrodynamique (cf. Figure 2).

### **2.2.2. Laser**

Le laser utilisé est de type Nd :YAG à double cavité, de marque BigSky. Il permet de générer des impulsions lumineuses de 120 mJ, dans la longueur d'onde 532 nm et à une cadence pouvant atteindre 15 Hz. Conçu pour des applications militaires et refroidi à l'eau, il est très robuste et peut être utilisé en environnement humide et dans toutes les positions.

Le plan lumineux est généré à l'extrémité inférieure d'un bras optique. L'extrémité supérieure du bras reçoit une plate-forme de fixation du laser (cf. Figure 2). Un collimateur en sortie du laser et un miroir incliné réglable monté sur la plate-forme permettent de focaliser le faisceau laser sur l'optique de génération du plan laser situé en bas du bras optique. L'ensemble est ensuite monté soit dans le mât support de la sonde caméra, de manière à générer un plan perpendiculaire à la sonde (configuration de mesure intégrée, cf. Figure 3 et Figure 4), soit monté dans un support caréné séparé (configuration séparée, cf. Figure 5).

### **2.2.3. Acquisition, contrôle et traitements**

Les images sont enregistrées en temps réel par un équipement nommé « hub ». Cet équipement assure la synchronisation entre les caméras et les impulsions laser, et stocke les images en mémoire. Cette synchronisation peut être calée sur un signal TTL extérieur (synchronisation des mesures avec la rotation d'une hélice par exemple).

A la fin de l'acquisition, les images brutes sont transférées par liaison Ethernet (1 Gigabit/s) du hub vers une unité centrale de type PC bi-processeur (2.8 GHz). Les traitements sont ensuite réalisés sur l'unité centrale, à l'aide du logiciel PIV FlowManager.

Les différents réglages de caméra et l'étalonnage du système sont également pilotés depuis l'unité centrale.

Les traitements PIV des images peuvent être distribués sur trois calculateurs, de manière à réduire les temps de traitement.

### **2.2.4. Etalonnage**

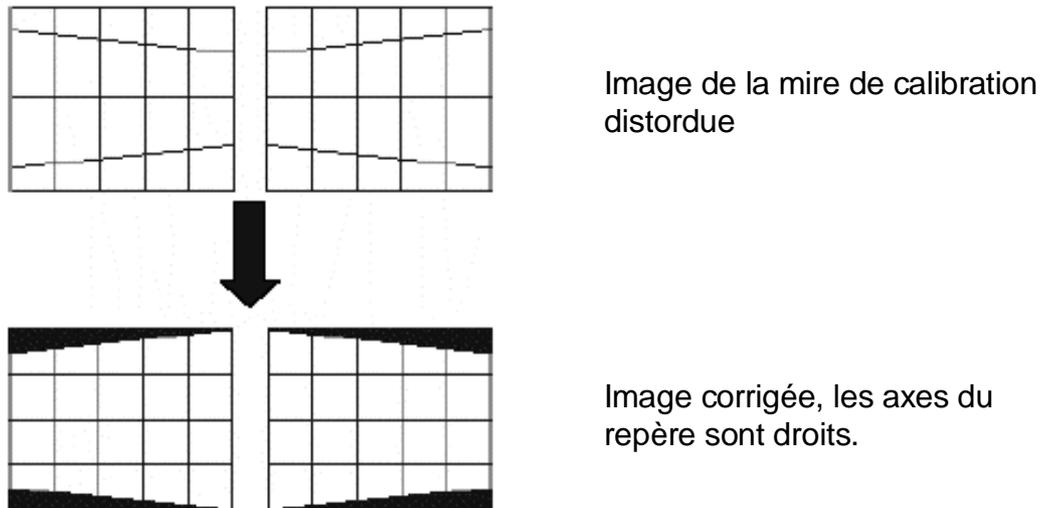
L'étalonnage consiste à établir les relations entre les coordonnées images (x,y) en pixel des points sur les images des deux caméras et les coordonnées objets (X, Y, Z) dans le repère physique.

Le principe de base consiste à utiliser une grille de points (mire) régulièrement espacés placée parallèlement au plan laser, dans le champ de vue commun aux deux caméras, et successivement à plusieurs positions dans l'épaisseur du plan. Lors de la prise de vues, les images de la grille apparaissent distordues par les effets de perspective. Corrigées après l'étalonnage, les axes de la grille apparaissent horizontaux et verticaux.

Une alternative au déplacement de la mire consiste à utiliser une mire à double niveau (non plane) qui contient des points placés dans deux plans distincts. D'autre part, lorsque les caméras sont placées de part et d'autre du plan de mesure, les deux faces de la mire doivent présenter une grille de points de manière à obtenir des points visibles simultanément sur les deux caméras à chaque position de la mire.

Ainsi, deux mires sont utilisées avec le système : une mire double face simple niveau de 450x450 mm et une mire double face double niveau de 270x190 mm.

En pratique, la mire doit être fixée à l'extrémité d'un mât vertical (cf. exemple de montage sur la Figure 5). Ce dernier est fixé sur une table de déplacement X, Y, Z, équipée de comparateurs, qui permet de déplacer de manière précise la mire dans le champ de vue.



### **2.2.5. Ensemencement**

La qualité de l'ensemencement est primordiale pour la qualité des mesures et sa maîtrise constitue un des points les plus délicats de la mise en œuvre d'un système PIV. Les contraintes à respecter sont les suivantes :

- Les particules doivent suivre l'écoulement. Elles ne doivent donc pas être trop grandes et leur densité doit être très proche de l'unité.
- Elles doivent cependant avoir une taille suffisante pour que leur image soit analysable.
- La concentration en particules dans la zone de mesure doit être aussi homogène que possible. Elle doit être suffisante pour obtenir des vecteurs dans chaque zone d'interrogation des images, mais pas trop forte de manière à ne pas pénaliser le contraste des images.
- Le mode d'injection des particules ne doit pas perturber l'écoulement.

Différentes particules ont été testées et les meilleurs résultats ont été obtenus avec des particules de polyamide, sphériques, de diamètre 20  $\mu\text{m}$  et de densité 1.03.

Les particules sont diluées dans un mélange d'alcool et d'eau, puis injectées dans l'écoulement. Une machine spécifique assure le pompage de l'eau du bassin, le mélange de l'eau et des particules et l'injection du mélange dans l'écoulement.

Les différentes campagnes d'essais réalisées précédemment par Sirehna avec un système de PIV-2C ont permis de définir plusieurs modes d'injection des particules dans l'écoulement. La méthode la plus couramment utilisée consiste à ensemencher tout le volume balayé par la zone de mesure à l'aide d'un « râteau de distribution » immergé lors du retour du chariot à sa position initiale après chaque remorquage. Ce dispositif est immergé lors de l'ensemencement et relevé avant chaque remorquage. D'autres modes d'injection, par pulvérisation au dessus de la surface libre par exemple, sont mis en œuvre, en fonction de la position de la zone à ensemencher et du dispositif expérimental à étudier.

## **2.3. CONFIGURATIONS DE MESURE POSSIBLES**

Le système est modulaire de manière à offrir le plus grand nombre de configurations de mesure, c'est-à-dire d'orientation du plan de mesure et d'implantation des équipements. Plusieurs configurations sont ainsi actuellement possibles (cf. Figure 6) :

Le plan de mesure (plan laser) peut être parallèle, perpendiculaire ou oblique par rapport à la sonde caméra (donc par rapport à la vitesse d'avance en condition de remorquage).

Les axes de visée des caméras peuvent être symétriques ou dissymétriques par rapport à l'axe perpendiculaire à la sonde.

En configuration dissymétrique, le plan de mesure peut se situer en amont ou en aval de la sonde caméra.

En configuration symétrique avec un plan de mesure perpendiculaire à la sonde caméra, le plan laser peut être généré directement depuis la sonde caméra (cf. Figure 4). Ce montage présente l'avantage d'être compact, de faciliter l'alignement du plan laser par rapport au champ de vue (alignement réalisable à terre), et de ne pas demander d'étalonnage à chaque déplacement de la sonde caméra.

Dans les autres configurations, le plan laser est généré depuis la sonde laser (cf. Figure 5). L'optique située à l'extrémité inférieure de la sonde laser permet de générer un plan vertical, d'axe horizontal ou vertical et orientable sur 360° autour de l'axe vertical. Elle permet également de générer un plan horizontal. Des adaptations seraient cependant nécessaires au niveau de la sonde caméra pour effectuer des mesures dans des plans horizontaux.

D'autres montages peuvent être mis en œuvre pour satisfaire des besoins particuliers d'orientation du plan laser (axe oblique pour éviter certains masquages par exemple) ou des contraintes d'intégration sur le moyen d'essais. La génération du plan laser depuis la surface libre à travers une barge à fond plat par exemple permet de réduire la hauteur immergée du montage et de générer un plan laser vertical d'axe oblique.

Cette grande modularité permet d'accéder à des zones de mesure d'accès difficile, par exemple près des pales d'hélices, à proximité d'appendices de coque et sous la carène.

Les deux modules caméras peuvent également être séparés de la sonde. Utilisés simultanément ils peuvent ainsi autoriser des champs de vue de grande dimension en PIV-2C.

### **3. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU SYSTEME**

- Zone de mesure réglable de 50 mm x 50 mm environ jusqu'à 500 mm x 500 mm.
- Vitesse de remorquage pouvant atteindre 6 m/s.
- Vitesse maximum mesurable: supérieure à 100 m/s (écart minimum entre deux images de 1  $\mu$ s).
- Immersion maximale de la sonde caméra en remorquage : 1 m ; les modules caméras sont de plus étanches à une immersion de 5 m ce qui permet de les utiliser, au point fixe, à cette profondeur.
- Fréquence de mesure pouvant atteindre 13 cartes de vitesse par seconde.
- Différentes solutions de déclenchement des mesures sont possibles. Une série de mesures peut être déclenchée à partir d'un signal TTL extérieur. Le système peut également être déclenché de manière cyclique, par un signal TTL périodique. Ce mode de déclenchement permet d'étudier des phénomènes cycliques, tels que l'écoulement autour d'une hélice par exemple, en synchronisant les acquisitions sur la position de la pale.
- Durée d'acquisition pouvant atteindre 5 minutes environ à la cadence maximum.
- Précision de mesure de vitesse : le principe de mesure fait intervenir intrinsèquement un moyennage temporel, le déplacement des particules étant mesuré à partir de deux images successives, et un moyennage spatial sur la zone d'interrogation. Le délai entre les impulsions laser et la taille de la zone d'interrogation doivent donc être adaptés aux vitesses maximales et aux échelles les plus fines de l'écoulement à mesurer. La précision de mesure va également dépendre de nombreux autres paramètres : taille du champ de vue, orientation des axes de visée par rapport au champ de vue, qualité de l'étalonnage, qualité de l'ensemencement, qualité de l'eau, épaisseur du plan laser (en particulier pour la précision sur la composante hors plan). On peut cependant estimer une précision typique de 2% pour les composantes de vitesse dans le plan de mesure et de 5% pour la composante hors plan.

- Nombre de vecteurs vitesse par carte (zone d'interrogation de 32x32 pixels, recouvrement de 50% ; sans zone de masquage) : 7000 environ.
- Capacité de stockage des images importante : environ 3.6 Mo par paire d'images, soit, pour une acquisition de 25 s à 10 Hz, environ 1.8 Go. L'archivage est effectué sur un disque dur externe de 200 Go.
- Durée d'un traitement : environ 35 minutes pour 250 cartes de 7000 vecteurs vitesse chacune.
- Possibilité d'effectuer les traitements PIV en batch, pour les réaliser la nuit entre les journées d'essais par exemple, et de distribuer le traitement PIV sur trois calculateurs afin de réduire la durée des traitements.
- Temps caractéristiques de mise en œuvre (dépend des possibilités d'accès et de manutention sur le site d'essais) :
  - Assemblage et réglages optiques (caméras et laser) en air : 1.5 à 2 jours pour la première configuration, environ une demi-journée pour les changements de configuration suivants.
  - Installation sur le moyen d'essais, vérification des réglages en eau, vérification de la synchronisation avec le dispositif expérimental, étalonnage (à refaire à chaque changement de position entre le plan laser et la sonde caméra) : une demi-journée.
  - Essais productifs : environ 10 passages par jour
    - ✓ Ensemencement après chaque passage lors du retour du chariot.
    - ✓ Vérification de la synchronisation des acquisitions et de l'enregistrement des images entre chaque passage.
  - Dépouillement : pendant la campagne (batch, traitement distribué) ou après la campagne.
  - Démontage, expédition : environ une demi-journée.
- Servitudes sur le site d'essais :
  - Equipements alimentés en 220 VAC.
  - Moyens de levage et de manutention (caisses de transport de 300 à 400 kg, poids des ensembles à installer sur le chariot : 120 kg maximum).
  - Aide ponctuelle de deux opérateurs locaux pour les opérations de manutention.
  - Filtrage de l'eau du bassin recommandé.
  - Obscurité non requise, mais prévoir de couper localement l'éclairage.
  - Sécurité vis-à-vis du laser : restriction de l'accès à la zone de mesure et mise en place de caches localement au-dessus de la zone de mesure à prévoir.

#### **4. EXEMPLE D'APPLICATION : PROJET « LEADING EDGE »**

##### **4.1. CONTEXTE ET OBJECTIF DES ESSAIS**

Le système a, pour la première fois, été mis en œuvre pour MARIN dans le bassin dépressurisé de EDE, lors de deux campagnes d'essais réalisées par MARIN en juin et septembre 2004, dans le cadre du projet européen « Leading Edge » (EC GROWTH GRD2-2002-50105).

L'objectif du projet « Leading Edge » est de permettre la prédiction de l'écoulement au bord d'attaque et en extrémité des pales d'hélice afin d'améliorer la conception d'hélices silencieuses et de rendement élevé. Les travaux de ce projet comportent une partie numérique, visant à développer puis exploiter un code de calcul RANS, et une partie expérimentale visant à développer un système de mesure PIV-3C adapté puis à mettre en œuvre ce système pour obtenir des données de référence pour la validation des calculs CFD.

L'objectif principal des essais réalisés à EDE était de valider les performances du système pour capturer le tourbillon près du bord d'attaque et de l'extrémité de pale.

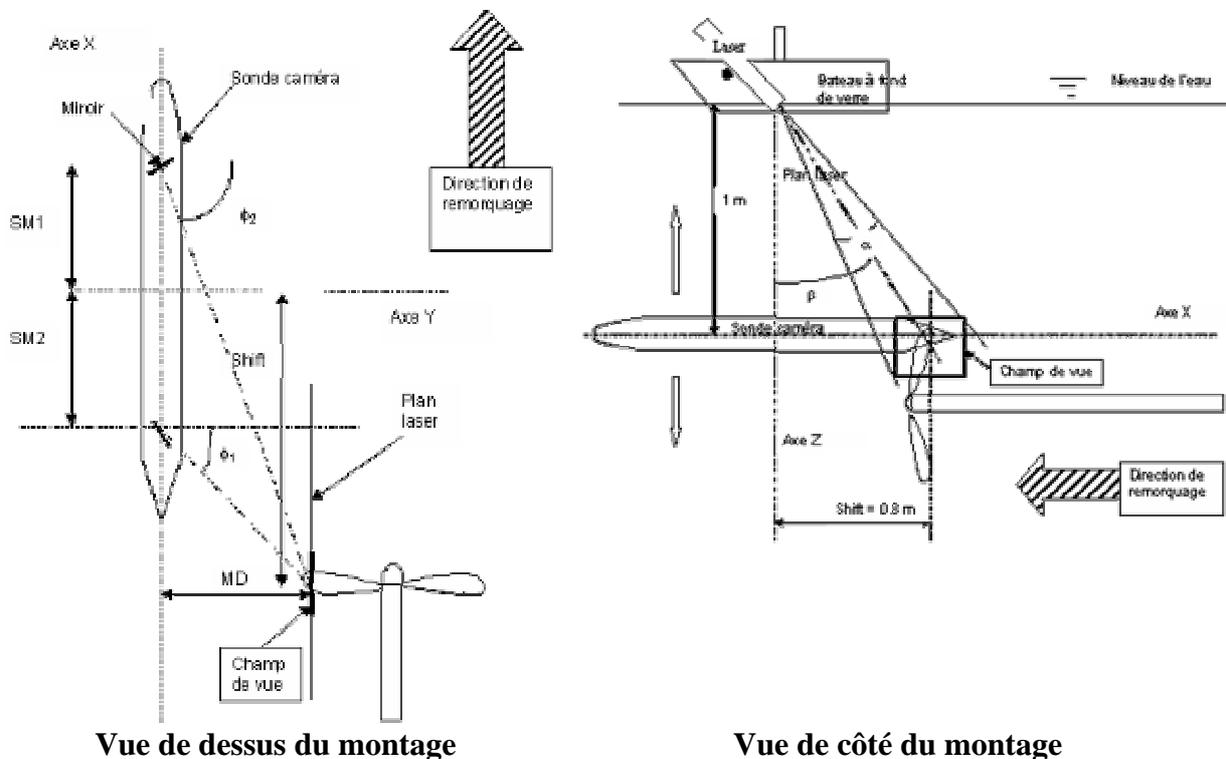
##### **4.2. MONTAGE EXPERIMENTAL**

Les essais ont été réalisés en eau libre (sans carène) de manière à assurer un champ de vitesse amont uniforme. Trois formes d'hélices ont été testées. Les hélices ont été montées à

l'extrémité d'un axe longitudinal, fixé à l'extrémité inférieure d'un mât vertical profilé, lui-même relié au chariot de remorquage par l'intermédiaire d'un dispositif pouvant être translaté perpendiculairement à l'axe du bassin. Le dispositif expérimental permettait de régler la vitesse de rotation de l'hélice et la vitesse d'avance du chariot de manière à obtenir les valeurs souhaitées du paramètre d'avance.

Huit plans de mesure ont été utilisés sur chaque hélice. Ces plans sont longitudinaux et répartis en deux groupes de quatre plans parallèles entre eux, répartis sur le bord d'attaque d'une pale, comme représenté sur la Figure 8. Pour une hélice donnée, les acquisitions ont été réalisées sur une même pale ou une pale sur deux, en synchronisant le déclenchement des mesures sur le signal de rotation de l'hélice. Les différents plans de mesure ont été obtenus successivement en déplaçant latéralement le mât supportant l'hélice et en ajustant le retard du déclenchement des acquisitions par rapport au signal de rotation de l'hélice.

Le tourbillon à capturer se trouvant du côté de la face dépressurisée de la pale, la zone d'intérêt pour la mesure se trouve en amont de l'hélice. En conséquence, la configuration du système de PIV-3C choisie est asymétrique avec la sonde caméra placée en amont de l'hélice. De plus, afin de limiter le masquage du plan laser généré par le bord d'attaque de la pale, un plan vertical oblique, orienté vers l'aval, a été généré depuis la surface libre à travers une petite barge à fond plat et transparent. Des schémas du montage sont présentés ci-dessous :



Une vue du montage est présentée sur la Figure 7.

La taille du champ de vue a été réduite de manière à offrir le maximum de résolution pour détecter les tourbillons. Une résolution de l'ordre de 1 mm a ainsi été obtenue pour un champ de vue, commun aux deux caméras, de 95 x 65 mm et un dépouillement effectué avec une zone d'interrogation de 32 x 32 pixels et 50% de recouvrement.

Sur chaque hélice, les pales sur lesquelles les mesures étaient effectuées ont été peintes à l'aide d'une peinture spéciale à base de rhodamine permettant de réduire la réflexion du plan laser sur la pale.

Des exemples de résultats obtenus sont présentés dans le chapitre 5.2.

## **5. ANALYSE ET EXPLOITATION DES MESURES**

### **5.1. ANALYSE DES IMAGES BRUTES**

Le dépouillement des paires d'images des deux caméras se compose d'un enchaînement de traitements dont le script se définit dans le logiciel FlowManager.

Dans un premier temps, le bruit de fond et les réflexions éventuelles sur des objets fixes visibles dans le champ de vue sont atténués en soustrayant à chaque image une image calculée par moyenne de toutes les images de l'essai.

Le calcul d'inter-corrélation sur chaque paire d'images est ensuite effectué. Différentes fonctions de validation peuvent être utilisées à ce niveau pour supprimer les vecteurs semblant aberrants, et éventuellement les remplacer par interpolation.

Des masques, définis manuellement lors de l'établissement du script, peuvent ensuite être appliqués de manière à rejeter les vecteurs obtenus dans certaines zones (zones de réflexion par exemple). A ce niveau, une carte de vitesse 2C est obtenue pour chaque paire d'images de chaque caméra.

La recombinaison des cartes 3C est finalement réalisée en combinant les cartes 2C avec la loi d'étalonnage.

### **5.2. EXPLOITATION DES MESURES**

Le logiciel de PIV FlowManager permet d'effectuer quelques traitements complémentaires des cartes de vitesse 3C :

- Soustraction d'un vecteur vitesse constant (vitesse de remorquage).
- Extraction de profils spatiaux ou temporels, calcul de statistiques spatio-temporelles, calcul de cartes de vorticité, d'intensité de turbulence et de densité spectrale de puissance.
- Visualisation des cartes de vitesse 2C et 3C, visualisation des résultats listés ci-dessus.

Ces traitements et visualisations restent cependant limités à chaque plan de mesure. Une exploitation tri-dimensionnelle des mesures PIV-3C est possible en utilisant le logiciel FIELDVIEW, dédié à l'exploitation de résultats de calculs CFD. Dans un premier temps, les cartes de vitesse sont exportées depuis FlowManager sous forme de fichiers ASCII puis importées dans FIELDVIEW.

Les principales possibilités offertes par FIELDVIEW vis-à-vis de l'exploitation des cartes de vitesses 3C sont les suivantes :

- Représentation spatiale tridimensionnelle des résultats, positionnés par rapport à l'objet étudié. Ce type de représentation est primordial dans le cas d'écoulements complexes autour de géométries tridimensionnelles. La Figure 8 présente un exemple de représentation spatiale de résultats obtenus lors des essais « Leading Edge ». La géométrie de l'hélice est importée à partir d'un fichier IGES surfacique de l'hélice. Le logiciel permet de visualiser les résultats sous différents angles de vue et de visualiser séparément chaque plan de mesure (cf. Figure 9).
- Analyses tridimensionnelles de l'écoulement : le logiciel permet des fonctions telles que le calcul des lignes de courant et la détection automatique des tourbillons. Ces fonctions nécessitent cependant une discrétisation spatiale de l'écoulement fine, c'est-à-dire une distance entre les plans de mesure suffisamment petite par rapport aux phénomènes étudiés. La Figure 10 présente les tourbillons détectés par FIELDVIEW pour une série de mesures des essais « Leading Edge ».
- Comparaison entre des cartes de vitesse mesurées et des champs de vitesse issus de simulations numériques interpolés par le logiciel au niveau des plans de mesure. Cette comparaison peut être qualitative, par une animation présentant simultanément

les deux séries de cartes par exemple ou quantitative, en présentant les cartes résultant de la différence, en chaque point, entre résultats numériques et expérimentaux.

## **6. CONCLUSION**

Un nouveau système de PIV-3C, permettant de mesurer des champs de vitesse tri-composantes, spécifiquement conçu pour une utilisation en bassin de traction, a été acquis par SIREHNA.

Ce système est robuste, pour une utilisation hors laboratoire, modulaire afin de permettre de multiples configurations de mesure et d'implantation sur les moyens d'essais et a pour vocation d'être mobile. La prestation de mesure avec ce système est dorénavant proposée par SIREHNA, le système pouvant être transporté, installé et opéré par un opérateur SIREHNA sur un essai mis en place et dirigé par le site d'accueil.

Le système est conçu pour être remorqué en bassin afin d'effectuer des mesures dans des plans fixes par rapport à la maquette étudiée. D'autres utilisations sont envisageables :

- Mesures au point fixe en bassin de traction ou en bassin de houle : étude de sillages (la maquette passe dans le plan de mesure ; les cartes de vitesse successives sont obtenues à des distances croissantes par rapport à la maquette), étude d'écoulements autour de structures fixes soumises à la houle,...
- Mesures au point fixe en canal de circulation, en tunnel de cavitation, dans des boucles hydrauliques (mesures à travers les hublots du moyen d'essais).
- Mesures à échelle réelle (système au point fixe ou embarqué).
- Mesures en soufflerie (l'ensemencement devant alors être adapté à un écoulement aérien, éventuellement en boucle ouverte).

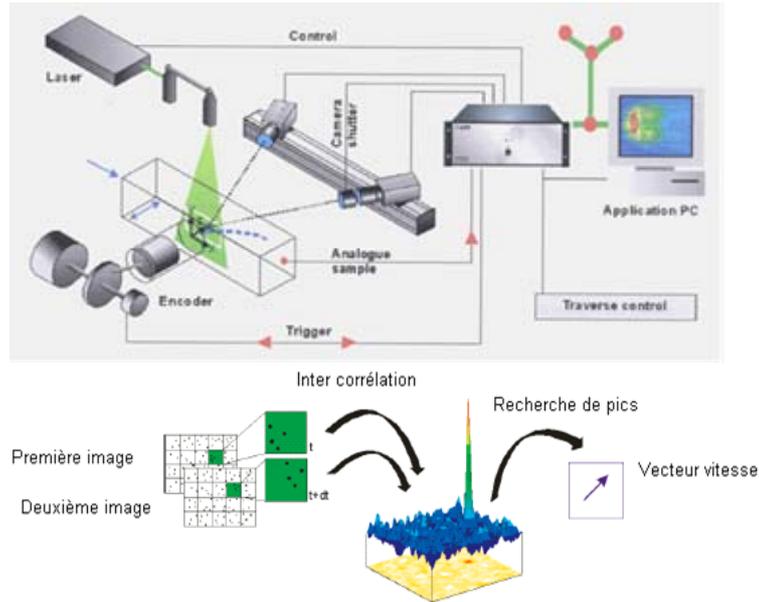


Figure 1 – Principe de prise de vue de la PIV-3C et de l’analyse des paires d’images



Figure 2 – Vue de la sonde caméra sur son support caréné

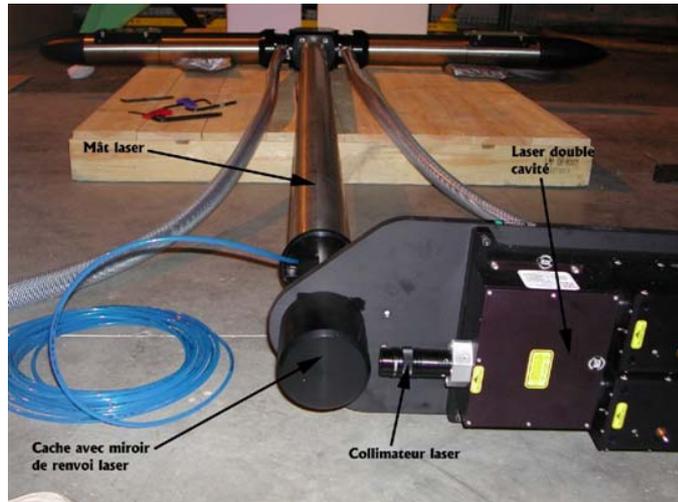


Figure 3 – Génération du plan laser depuis la sonde caméra

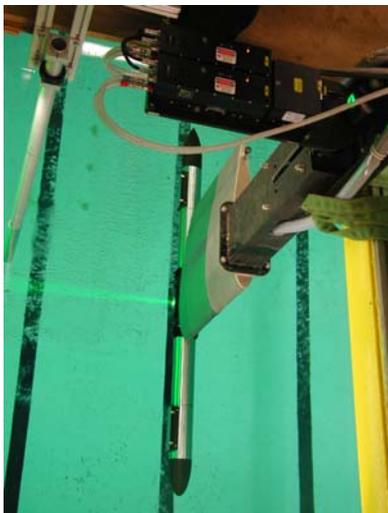


Figure 4 – Sonde laser intégrée



Figure 5 – Sonde laser séparée

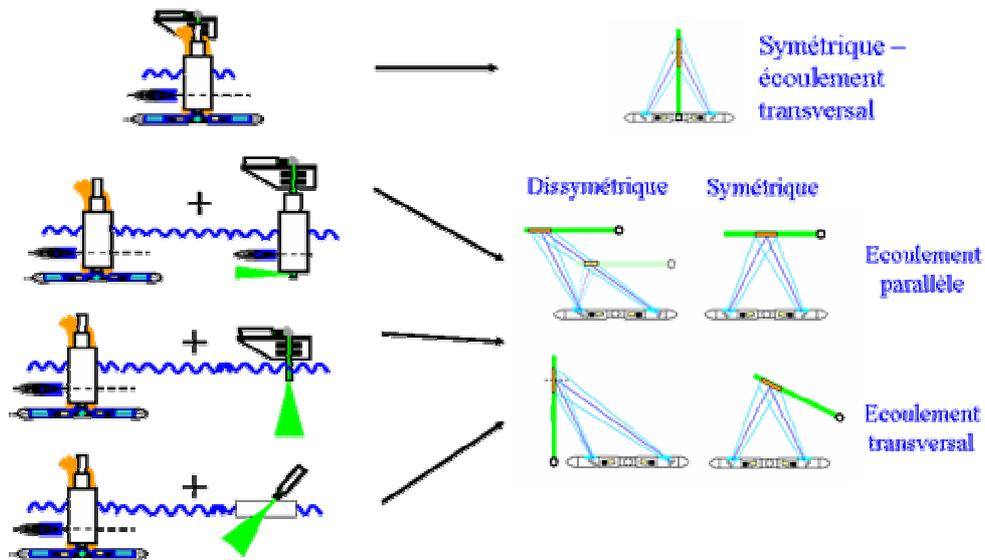


Figure 6 – Exemples de configurations de mesure

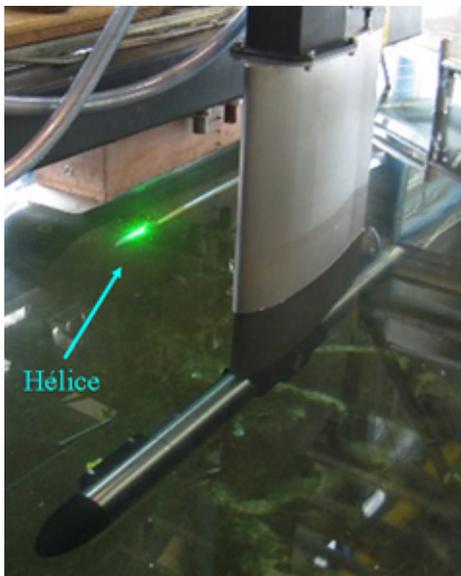


Figure 7 – Vue du montage « Leading Edge »

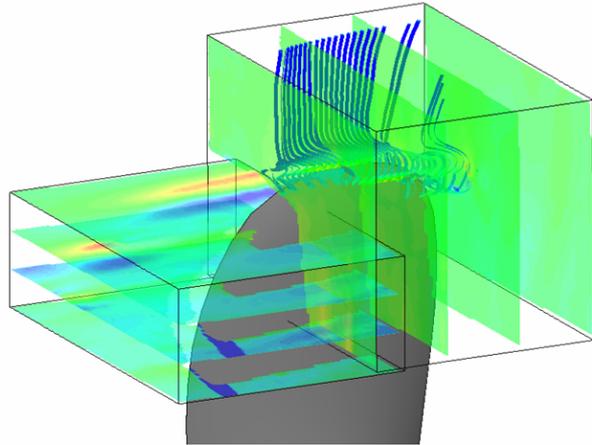


Figure 8 – Vue des plans de mesure et des lignes de courant obtenue sous FIELDVIEW

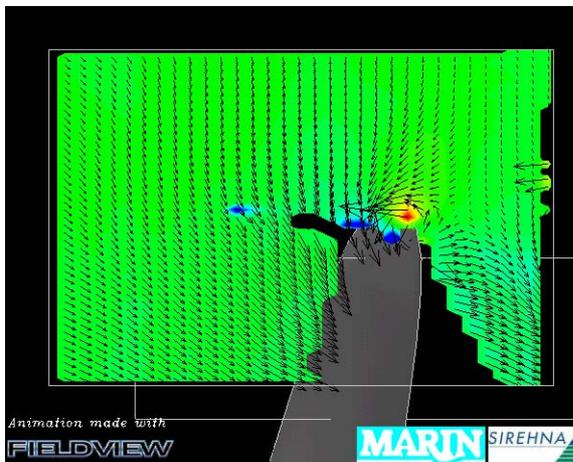


Figure 9 – Exemple de carte de vitesse 3C obtenue

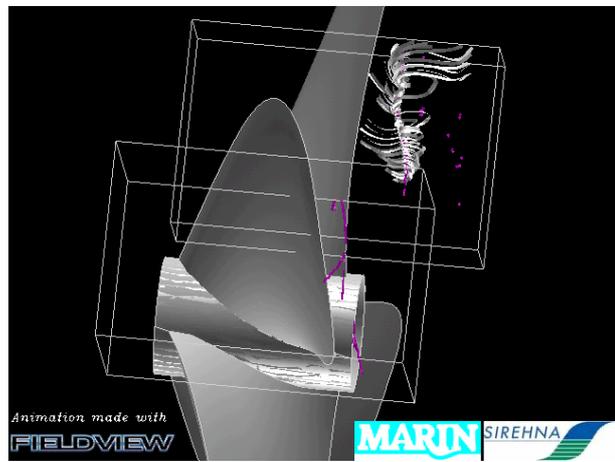


Figure 10 – Exemple de tourbillons détectés par FIELDVIEW