

Mise en œuvre d'un Lidar Doppler 1.5µm et de la SPIV pour la caractérisation d'écoulements sur une plateforme d'appontage d'une maquette simplifiée de Frégate en soufflerie

B. AUGÈRE^a, D. GOULAR^a, M. VALLA^a, Y. GOULAR^a, A. DOLFI-BOUTEYRE^a, J.C. MONNIER^b, A. GILLIOT^b, Q. GALLAS^b

a. Département Optique et Techniques Associées, ONERA - The French Aerospace Lab., F-59045 Palaiseau, France - beatrice.augere@onera.fr

b. Département Aérodynamique, Aéroacoustique et Aéroélasticité, ONERA - The French Aerospace Lab., F-59045 Lille, France

Résumé :

Le centre Onera de Lille a effectué dans sa soufflerie L2, des mesures d'écoulement sur une maquette simplifiée de frégate afin de caractériser quantitativement et d'une manière détaillée des phénomènes instationnaires qui y sont présents. Outre des capteurs de pression, deux systèmes optiques ont été mis en œuvre pour cette étude : une chaîne PIV 3 composantes et un anémomètre Lidar. L'intérêt de la mesure Lidar est la réalisation d'une mesure à distance donc sans perturbation de l'écoulement ainsi que le potentiel très intéressant d'être transposable en grandeur réelle sur une frégate à échelle 1. Pour ces essais en soufflerie, l'anémomètre Lidar a été conçu autour d'une architecture entièrement fibrée utilisant une source laser continue émettent à 1.5µm, longueur d'onde à sécurité oculaire et également un système de balayage permettant de couvrir une ligne de mesure sur la zone d'appontage en moins de 10ms vu l'évolution rapide des phénomènes à observer. Par rapport à la PIV qui fournit une carte des vitesses instantanées à la cadence de 5Hz, le Lidar fournit un scan de mesure de champ de vitesse de durée 10ms à la cadence de 10Hz.

Le détail de la méthode de mesure ainsi que les résultats de mesures issues des différents instruments sont présentés dans cet article.

Abstract :

The ONERA Lille center has performed experimental work in the low speed windtunnel L2 to study the flow field on the helideck of a simplified frigate test model. This work is aimed to improve the understanding of the dynamics air wake mechanisms that can be perceived by helicopter pilots during take-off and landing operations. The overall objective is to reconstruct the dense flow field from sparse real-time measurements. To do so, the full flow field is first measured by classical velocimetry (PIV) and surface pressure probes mounted on the helideck surface. A complementary measurement is performed using a Lidar system. All three measurement systems (pressure, SPIV, Lidar) are synchronized together to measure the flow field at a known instant in time. The interest of using Lidar lies on its capability to make the measurement at scale 1. The Lidar can remotely measure the flow field through the velocity projection on its measurement axis. For this wind tunnel testing, the Lidar anemometer has been designed around a fully-bridged architecture using a continuous laser source emitting at 1.5µm, wavelength for eye safety and also a scanning system to cover a measuring line on the landing zone in less than 10ms given the rapid evolution of the phenomena to be obeyed. Compared to the PIV which provides a map of instantaneous speeds at a rate of 5Hz, the Lidar provides velocity measurement every 10ms at rate of 10Hz for the full field.

The details of the measurement method as well as the results of the measurements of the various instruments are presented in this article.

Mots clefs : Lidar, PIV, soufflerie, frégate, appontage

1 Introduction

La problématique d'appontage sur frégate est étudiée depuis de nombreuses années à l'ONERA. Un des thèmes de recherche actuel porte sur la capacité à pouvoir reconstruire l'écoulement tridimensionnel à partir de mesures ponctuelles faites en temps réel. Une technique étudiée est l'utilisation d'estimation stochastique [1] qui, à partir d'un champ dense préalablement acquis expérimentalement ou numériquement et de mesures ponctuelles pariétales ou dans le champ, permet de reconstruire tout ou partie du phénomène aérologique d'intérêt. Au niveau de la caractérisation fine de l'écoulement instationnaire présent sur le pont arrière d'une frégate, des résultats ont été récemment publiés dans [2] et [3]

L'ONERA travaille également depuis plusieurs années sur la conception et le test d'anémomètre Lidar émettant à la longueur d'onde $1.5\mu\text{m}$ pour la caractérisation fine de la dynamique des tourbillons de sillages dans des gammes de portée allant de 30m à 800m [4] ou pour la caractérisation aérologique sur des distances allant de 100m à 15km [5]. Le capteur Lidar permet d'effectuer une mesure précise in situ de vitesses d'écoulement avec le grand intérêt d'effectuer la mesure à distance donc sans perturbation de l'écoulement, et possède le potentiel d'être transposable en grandeur réelle sur une frégate échelle 1. De plus, l'utilisation de la technologie $1.5\mu\text{m}$ permet de concevoir un anémomètre Lidar compact, robuste, transportable sur site extérieur car basée sur une architecture fibrée avec des composants fiables et performants bénéficiant des développements des télécommunications.

2 Présentation du moyen technique et des techniques expérimentales

2.1 Soufflerie L2 et Maquette d'essai

La campagne d'essais a été réalisée dans la soufflerie basse vitesse L2 du Centre ONERA-Lille dont un schéma et une photographie sont présentés en *Figure 1*. Cette installation d'essais est une soufflerie à circuit ouvert placée dans un grand hall d'essais industriels. Elle possède une veine d'expériences ayant une largeur de 6 m, une hauteur de 2,4 m et une longueur de 13 m. Sa motorisation est constituée de 18 ventilateurs qui permettent de faire varier la vitesse en veine de 0 à 19 m/s. Le plancher de la veine d'essais est équipé d'un grand plateau tournant permettant de donner du dérapage à la maquette embarquée.

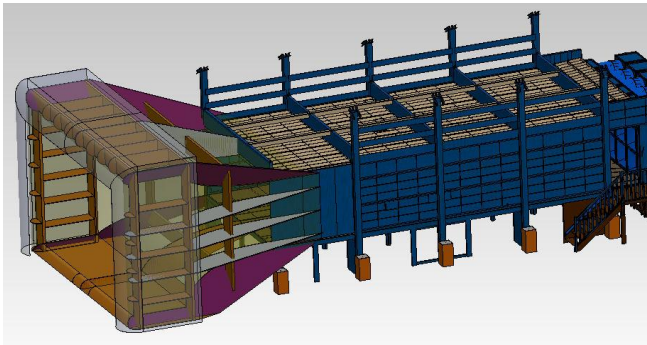
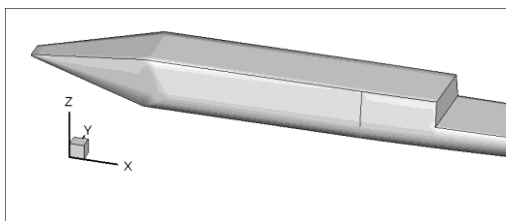


Figure 1 : Soufflerie basse vitesse L2 de l'ONERA-Lille

La maquette est un modèle réduit à l'échelle 1/100^{ème} d'une géométrie simplifiée d'un navire de type Frégate porte-hélicoptère dont un schéma et une photographie sont présentés en *Figure 2*. Elle a une longueur de 135 cm, une largeur de 19,5 cm et une hauteur de 12,5 cm. Sa partie arrière comporte une plateforme dont ses dimensions sont une longueur de 26,5 cm, une largeur de 18 cm. La paroi verticale située à l'avant de la plateforme correspond à la porte du hangar hélicoptère. Elle a une hauteur de 6,3 cm. Pour atténuer les risques d'éblouissement lors de la mise en œuvre de la vélocimétrie par images de particules (PIV), la maquette est entièrement peinte en noir mat.



a/ Vue de Côté

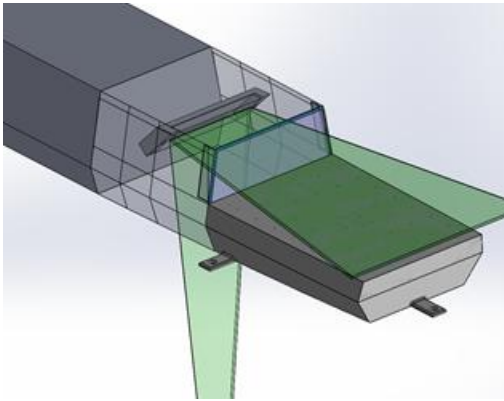


b/ Vue de dessus

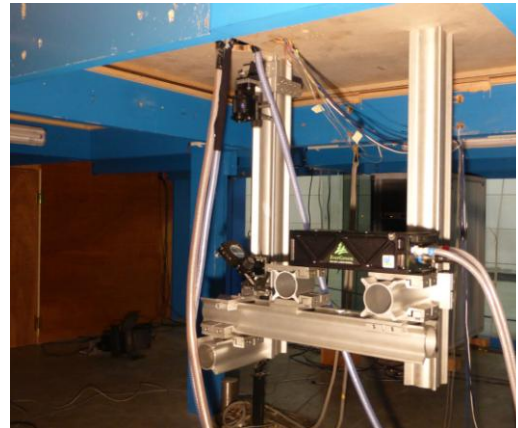
Figure 2 : Schéma et photographie de la maquette de Frégate simplifiée

2.2 Vélocimétrie par Image de Particules (DAAP)

Les mesures de vitesse de l'écoulement au-dessus de la plateforme sont effectuées par vélocimétrie par images de particules (PIV 2D3C) dont le principe est décrit dans la référence [4]. La *Figure 3b* présente une photographie du système d'éclairage de la chaîne de mesure PIV qui est une source laser Nd-YAG pulsé 2 x 200 mJ à 15 Hz maxi. Cet équipement et les pièces optiques nécessaires à la génération de la nappe laser au niveau de la zone de mesure sont dits en montage "embarqués". C'est-à-dire que tous ces éléments sont directement fixés au plateau tournant de la veine d'expériences comme l'est également la maquette. Dans cette configuration de montage, la nappe laser suit automatiquement la maquette dans ses mouvements de dérapage. Un tel montage présente le très grand avantage de pouvoir faire une polaire en dérapage sans avoir besoin, pour chacune des positions angulaires choisies, de re-positionner correctement la nappe laser dans la zone de mesure qui sont des opérations de réglage qui peuvent très vite s'avérer longues et donc coûteuses en temps. Par contre, ce montage "embarqués" complexifie un peu la conception de la maquette comme le montre la *Figure 3a*.



a/ Chemin optique de la nappe laser



b/ Source laser embarquée

Figure 3 : Implantation du dispositif de génération de nappe laser

Concernant l'ensemencement, les traceurs utilisés sont des micro-gouttelettes d'huile olive produites pour un générateur de type "Multi-Laskins Nozzle". Ils sont injectés dans l'écoulement par une grille placée en amont du convergent de l'installation d'essais.

Le système de prise de vues stéréoscopique est constitué de deux caméras CCD 2048x2048 pixels² codés sur 12 bits équipés d'objectif 105mm F/2. En pleine résolution, leur cadence maximale d'acquisition est de 5 clichés PIV (double-exposition) par seconde. L'implantation en veine d'essais de ce système de prise de vues est montrée en *Figure 4*. Le plan de mesure étant orienté parallèlement à la plateforme de la maquette, les deux caméras PIV sont fixées au plafond de la veine d'essais. Pour les protéger du vent mais aussi de l'ensemencement présent dans l'écoulement, elles bénéficient d'un capotage individuel non visible sur la figure. Les caméras ainsi que leur support sont suffisamment éloignés de la maquette pour éviter que leur présence ne perturbe l'écoulement au-dessus de la plateforme. Les caméras ici ne sont pas en mode embarquées et par conséquent ne suivent pas la maquette dans ses mouvements de dérapage. Par contre, le centre de la plateforme coïncidant avec l'axe de rotation du plancher tournant de la veine d'essais, la zone de mesure PIV reste dans le champ de vision des deux caméras pour des valeurs de dérapage maquette compris entre -10° et $+10^\circ$, limitant ainsi grandement le temps de réglage des caméras. Il suffit seulement de faire une calibration par valeur de dérapage.

**Figure 4 : Implantation du système de prise de vues stéréoscopique.**

Le dépouillement de l'ensemble des clichés PIV enregistrés pendant les essais a été effectué avec le logiciel DAAPPIV développé par le département DAAA de l'ONERA. Une description détaillée de ce soft est faite dans la référence [7]. L'analyse des images est réalisée par une méthode multi-passe d'intercorrélation par FFT (Transformée de Fourier Rapide). En fin du processus d'analyse des clichés, la taille de fenêtre d'analyse est de 32x32 pixels (soit environ 4,6x4,6 mm²) avec un chevauchement de 50% (soit un espacement inter-vecteur de 2,30 mm).

La Figure 5 présente deux exemples de champs de vitesse moyenne obtenus par PIV pour une même vitesse amont U_∞ et deux valeurs de dérapage maquette. Les lignes de courant tracées sur ces représentations graphiques permettent de visualiser clairement la topologie de l'écoulement moyen. Elles montrent la présence d'une zone de recirculation tridimensionnelle avec une structure tourbillonnaire principale en forme d'arche. La mise en dérapage de la maquette provoque une dissymétrisation de l'écoulement au-dessus de la plateforme (voir Figure 5b).

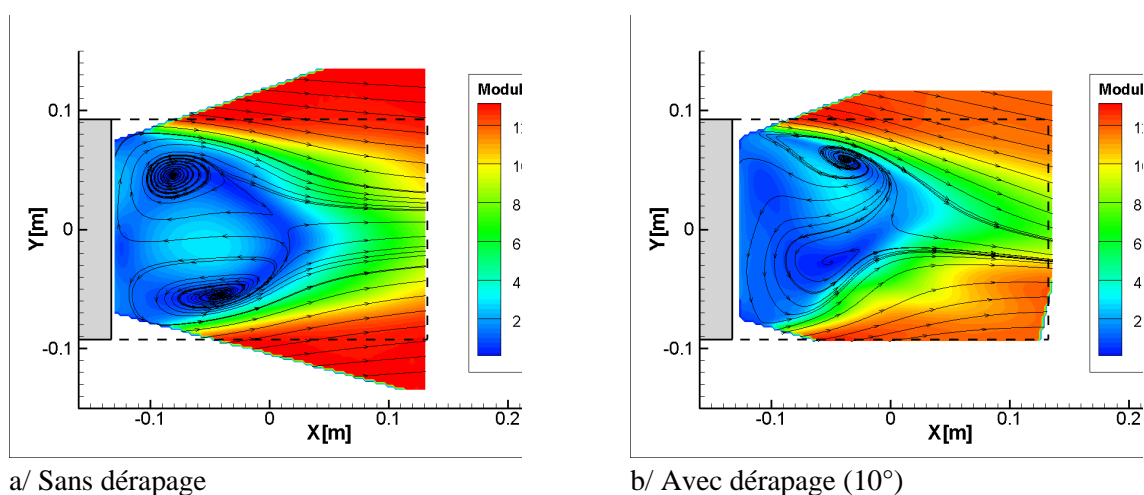


Figure 5 : Exemples de résultats PIV pour une vitesse amont $U_\infty \approx 12,9$ m/s

2.3 Anémomètre Lidar

Le principe de la mesure Lidar est illustré sur la Figure 6. Un faisceau laser est focalisé sur les aérosols (ici l'ensemencement), puis réfléchi par diffusion Mie. Le faisceau réfléchi est décalé en fréquence en raison du déplacement relatif entre les aérosols et le lidar (effet Doppler). Pour mesurer l'information de vitesse radiale contenue dans la phase du faisceau, le faisceau rétrodiffusé est mélangé dans un interféromètre optique avec un faisceau de référence (Oscillateur Local). Ce mélange cohérent permet, grâce à une différence de fréquences optiques proches, une transposition dans la gamme des radiofréquences accessibles aux détecteurs électroniques.

Le courant électrique issu du mélange cohérent (le courant dit hétérodyne) est fonction de : K un coefficient prenant en compte le rendement hétérodyne et l'efficacité du détecteur, P_s la puissance du faisceau rétrodiffusé, P_{OL} la puissance du faisceau Oscillateur Local, ν_s la fréquence du faisceau signal, ν_L la fréquence de l'oscillateur local, ϕ la phase du signal hétérodyne.

La fréquence Doppler est fonction de, V_{cible} , la vitesse de la cible projetée sur l'axe Lidar et de λ la longueur d'onde. Concrètement, la fréquence Doppler est de 1.3 MHz par m/s pour une émission

laser à la longueur d'onde de $1.54 \mu\text{m}$. Afin de mesurer le signe de la vitesse de déplacement des particules au point de focalisation du Lidar, un décalage en fréquence est introduit entre la fréquence ν_s du faisceau signal et la fréquence ν_L de l'oscillateur local par un modulateur acousto-optique (MAO) : ce décalage $\nu_s - \nu_L = \nu_{\text{MAO}}$ devient la nouvelle référence de fréquence autour de laquelle évolue la fréquence du signal à mesurer. Pour ces mesures en soufflerie la fréquence du MAO utilisé est de 40MHz. La bande passante de la chaîne électronique d'amplification et de filtrage autorise une mesure de $\pm 6 \text{ ms}$ environ.

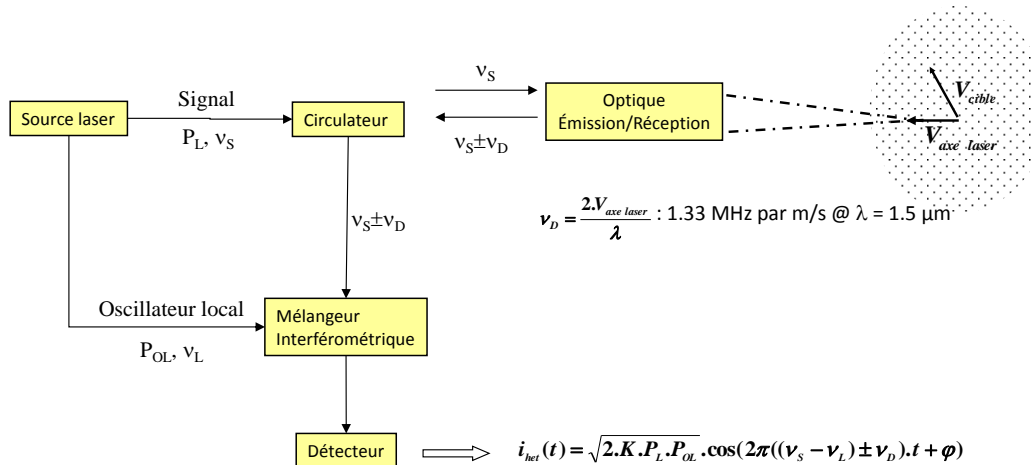
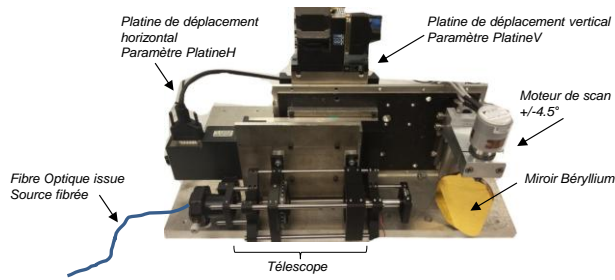


Figure 6 : Principe de l'anémomètre Lidar

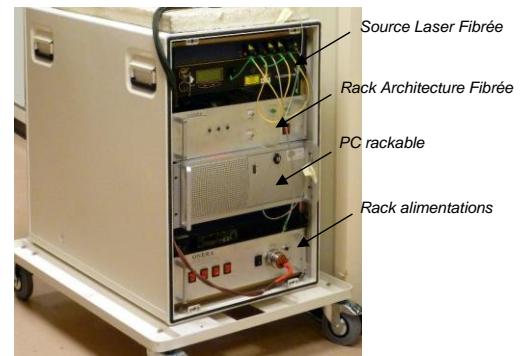
Pour les essais en soufflerie L2 sur une maquette simplifiée de frégate à échelle réduite, un Lidar spécifique a été développé afin de s'adapter au besoin de mesure très courte distance et également à la cadence élevée imposée par la rapidité des phénomènes d'écoulement à mesurer. Le système optique de l'anémomètre Lidar est entièrement fibré et il se décompose en :

- une source laser continue émettant à la longueur d'onde à sécurité oculaire de $1.5 \mu\text{m}$ intégrée dans un rack,
- une architecture optique fibrée incluant le circulateur, l'interféromètre et la détection, le tout intégré dans un rack,
- une tête optique incluant le télescope d'émission-réception ainsi qu'un miroir de balayage. Compte tenu de la résolution spatiale ($< 1 \text{ cm}$), le télescope a été défini en termes de diamètre (50 mm) et distance de focalisation (2 m) pour obtenir une zone efficace de mélange interférométrique très sélective; Le miroir de balayage est en Béryllium, matériau très léger, qui permet d'atteindre une vitesse de balayage de 1° par ms.

La Figure 7 ci-dessous illustre le système Lidar intégré : la tête optique (a) et la baie contenant les racks Laser, celui de l'architecture fibrée ainsi que ceux dédiés à l'alimentation et au traitement du signal (b). La tête optique peut être déportée de la baie de commande grâce à une fibre optique afin d'avoir une souplesse dans le positionnement du faisceau de sondage Lidar par rapport au pont de la maquette.



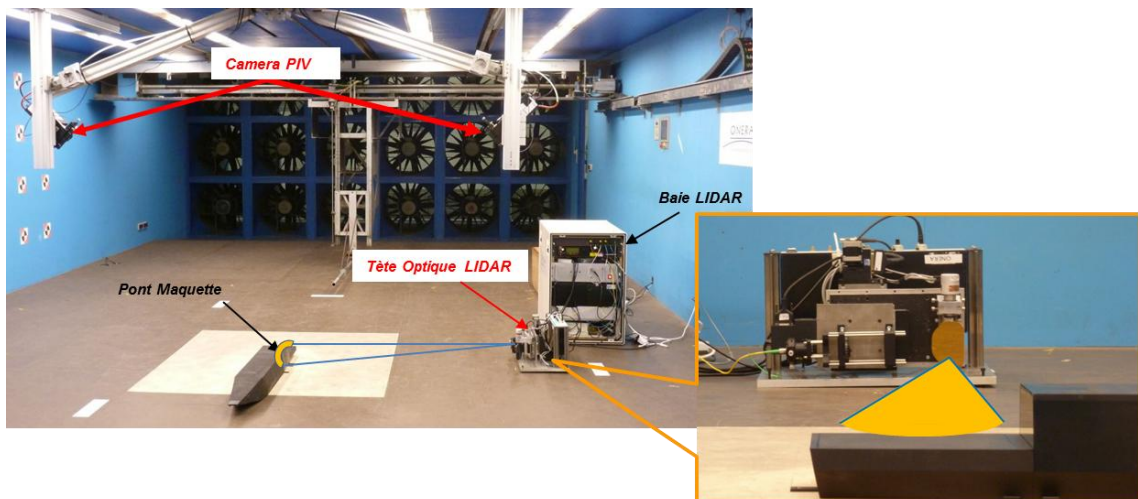
a/ Tête Optique du système Lidar



b/ Baie de Commande du système Lidar

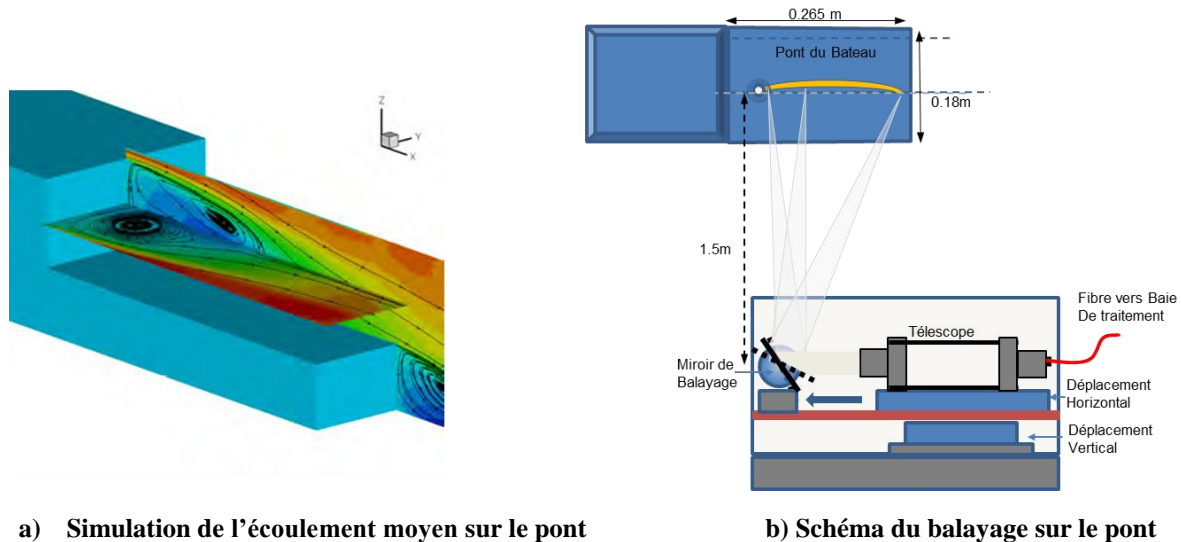
Figure 7 : Système Lidar (DOTA)

Dans la veine d'essai, le Lidar est situé sur le côté de la veine, à environ 1.5 m de la maquette, et vise perpendiculairement à la direction de l'écoulement. Les caméras de PIV sont positionnées au dessus de la maquette et l'implantation de la chaîne PIV est directement fixée au plancher tournant de la veine d'essais et sonde un plan horizontal parallèle à la plateforme d'appontage (Figure 8).

**Figure 8 : Implantation Lidar et PIV dans la veine d'essai**

L'anémomètre Lidar mesure la projection des vitesses air sur l'axe laser. Sa direction de visée est balayée dans le plan horizontal au-dessus de la plateforme d'appontage, fournissant des spectres de vitesse en des points jointifs situés sur une partie d'arc de cercle dans la direction de l'écoulement (Figure 9). Cette ligne de mesure peut être déplacée horizontalement (sur la largeur du pont) ou verticalement en déplaçant l'ensemble télescope + miroir de balayage.

Le système de balayage permet de couvrir une ligne de mesure sur la zone d'appontage en moins de 10ms, et le champ total de mesure à la cadence de 10Hz. La PIV fournit une carte des vitesses, dont la prise d'information est instantanée, à la cadence de 5Hz.



a) Simulation de l'écoulement moyen sur le pont

b) Schéma du balayage sur le pont

Figure 9 : Caractéristiques de la mesure Lidar

Le déclenchement des acquisitions s'effectue par un générateur externe à 10Hz. Le signal Lidar temporel est échantillonné à une cadence de 400 MHz et enregistré. Les données sont pré-traitées en temps réel sous Labview, afin de vérifier le bon fonctionnement du système et notamment pour adapter l'encensement et obtenir un bon rapport signal à bruit. Le traitement consiste à effectuer des Transformées de Fourier rapides (FFT) sur des portions d'échantillons temporels afin de calculer le contenu en fréquence de la mesure, ces fréquences étant reliées par l'effet Doppler aux vitesses des particules présentes dans le volume de mesure.

Les résultats du traitement sont présentés sous forme de spectrogramme (Figure 10) avec en abscisse la position latérale du point de mesure sur le pont (reliée par l'intermédiaire de l'instant d'acquisition à la position du miroir de balayage), en ordonnée les vitesses et la couleur est proportionnelle à la densité spectrale (échelle logarithmique).

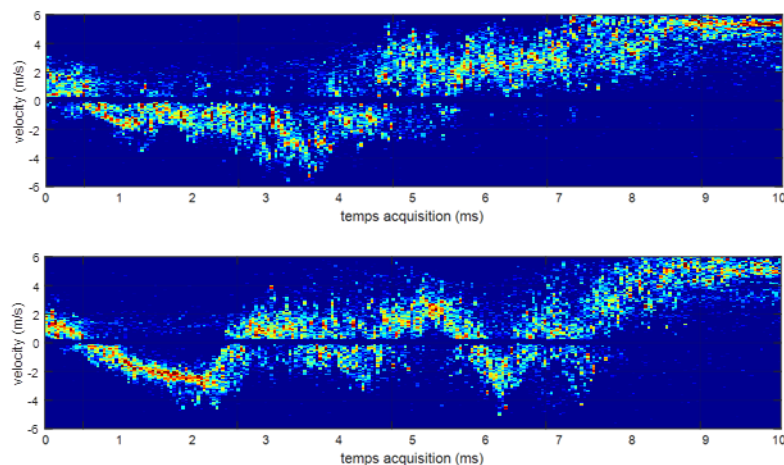


Figure 10 : spectrogramme de deux scans Lidar consécutifs (10Hz), permettant de visualiser l'évolution rapide des phénomènes.

La résolution en vitesse est reliée au nombre de points sur lequel la FFT a été effectuée, et la résolution spatiale est reliée à la vitesse de scan et au nombre de spectres moyennés. Ici les FFT sont faites sur 4096 points et 4 spectres ont été moyennés.

La mesure présente une zone aveugle autour de la vitesse zéro due à la présence d'un filtre (largeur du filtre ± 0.3 m/s) qui permet de rejeter les signaux dus à la réflexion sur les optiques et sur le mur du fond de la pièce.

3 Résultats expérimentaux

Afin de comparer les mesures Lidar et PIV, les vecteurs vitesses mesurés par la PIV sont projetés sur l'axe Lidar et une simulation de la mesure lidar permet d'obtenir les spectrogrammes Lidar que l'on aurait mesurés si le Lidar avait rencontré les vitesses mesurées par la PIV

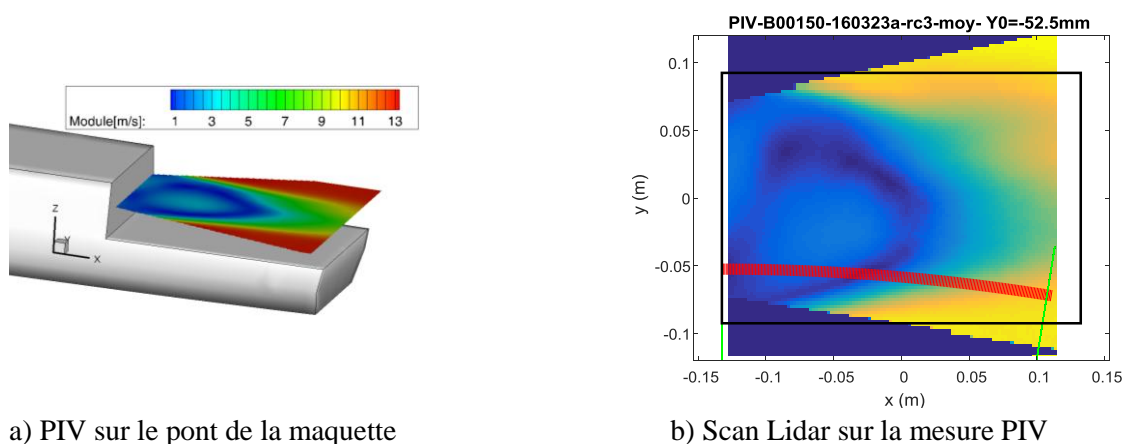


Figure 11 Projection des mesures PIV sur la zone de mesure Lidar

La simulation de la mesure Lidar à partir des données PIV est décrite par la figure ci-dessous (Figure 11). L'axe horizontal, qui pour le Lidar est un déplacement angulaire du miroir, est ici recalé sur l'axe des x de la PIV, et l'axe vertical des vitesses, est lui recalé dans la zone d'intérêt entre ± 6 m/s. L'échelle d'intensité est relative et restituée en échelle log.

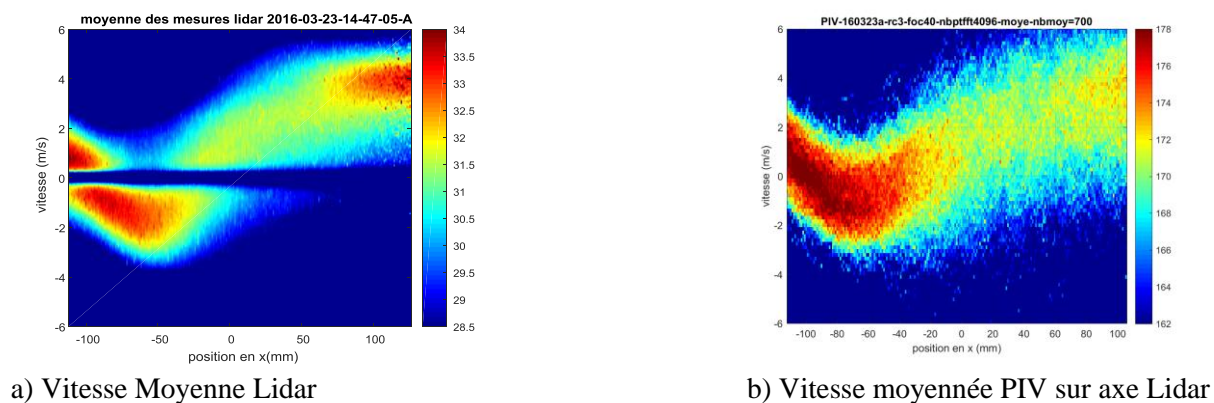


Figure 12 : Comparaison des mesures moyennées Lidar (a) et PIV (b)

Dans un premier temps, on compare la moyenne des spectrogrammes de la mesure Lidar (1000 mesures) et la moyenne des spectrogrammes Lidar simulés à partir des champs instantanés PIV (700 mesures). On constate une répartition des vitesses très similaire, ce qui permet de vérifier les paramètres géométriques liés à la configuration Lidar.

Les mesures non moyennées sont également comparées, et lorsque le phénomène a peu varié entre la prise d'information des deux systèmes, on constate une bonne correspondance des mesures Lidar et PIV.

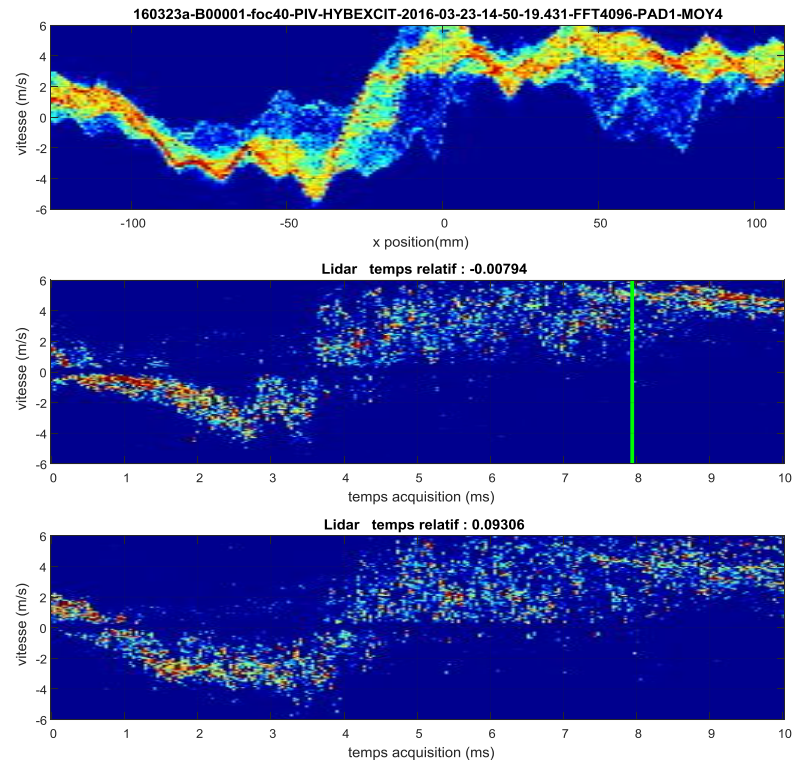


Figure 13 : Comparaison des mesures instantanées PIV et Lidar

La première image représente le spectrogramme Lidar simulé à partir du champ instantané PIV. Les deux autres images sont les spectrogrammes Lidar prises temporellement au plus proche de la mesure PIV, sachant que l'instant précis de la mesure PIV est matérialisé par le trait vert sur la première image Lidar. Le deuxième scan commence 0.1s après le début du premier.

On constate aussi sur l'image PIV (en haut), qu'en prenant en compte la zone de focalisation du Lidar de plusieurs millimètres et pour chaque position x sur le pont, les vitesses mesurées sont nombreuses et s'étalent sur plusieurs m/s. Le barycentre permet d'en extraire une vitesse par coordonnée d'abscisse x , mais on perçoit bien la difficulté à extraire une mesure exacte compte tenu de la dispersion de vitesse. Bien que ces mesures Lidar instantanées soient encourageantes, leurs analyses montrent la nécessité d'améliorer l'expérimentation, afin de parfaitement maîtriser les caractéristiques spatiales et temporelles de la zone d'analyse du Lidar.

4 Conclusions

Cet article décrit une expérimentation originale associant deux techniques de mesure optique pour caractériser en soufflerie l'écoulement au-dessus du pont d'envol d'une frégate simplifiée. Un système embarqué de Stéréo-PIV est conjointement installé avec un Lidar vent spécialement conçu pour cette expérimentation en soufflerie. Les mesures effectuées par les deux systèmes ont pu être comparées. Les valeurs moyennes des mesures de vitesses, effectuées pendant plusieurs minutes, ont permis de vérifier la bonne correspondance des mesures avec une précision meilleur que 0.5 m/s. Les valeurs de mesures instantanées montrent aussi une bonne correspondance, mais de nouveaux travaux sont envisagés pour améliorer la synchronisation des mesures et par la même permettre une comparaison plus efficaces des deux systèmes de mesure.

Remerciements

Une partie de ce travail a été soutenu par la plate-forme régionale CONTRAERO dans le cadre du CPER ELSAT 2020, cofinancé par l'Union Européenne, par l'Etat français et la Région des Hauts-de-France dans le cadre des Contrats Régionaux (CPER).

Références

- [1] A.Arnault, J. Dandois and J.-M. Foucaut Analysis of the filtering effect of the Stochastic Estimation and accuracy improvement by sensor location optimization. *Experiments in Fluids*, 57:185, (2016)
- [2] J.C. Monnier, A. Gilliot, Q. Gallas, M. Lamoureux, C. Geiler et J. Delva Analyse et contrôle d'écoulements sur une plateforme d'appontage d'une maquette simplifiée de Frégate.FLUVISU 2017, Le Mans, (20-24 mars 2017).
- [3] Q. Gallas, M. Lamoureux, J.-C. Monnier, A. Gilliot, C. Verbeke, and J. Delvan Experimental flow control on a simplified ship helideck . *AIAA Journal*, accepted for publication, (2017)
- [4] Dolfi-Bouteyre & Al Aircraft Wake Vortex Study and Characterization with 1.5 μm Fiber Doppler Lidar. *AerospaceLab*, 2009, n°1 p. 1-13
- [5] Agnes Dolfi-Bouteyre & Al *Long-range wind monitoring in real time with optimized coherent Lidar*. *Optical Engineering* Volume 56, Issue 03.March 2017 • 9 pages
- [6] Raffel M., Willert C., Werely S. et Kompenhans J. *Particle Image Velocimetry : A Practical Guide* Edition Springer, Second Edition, 448 pages, (2007)
- [7] Geiler C., Monnier J.C. *Industrialisation du Logiciel PIV – Phase 2. Rapport Technique ONERA N° RT 3/3623 GN*, (Mars 2012)