

# Couche limite et sillage rencontrés sur un chalut de fond

E. Bouhoubeiny<sup>a,b</sup>, G. Germain<sup>a,c</sup>, Ph. Druault<sup>b</sup>, B. Gaurier<sup>a,c</sup>, JV. Facq<sup>a</sup>, T. Bacchetti<sup>a</sup>

a. IFREMER, Service Hydrodynamique, 150 Quai Gambetta, 62321 Boulogne-sur-Mer, France.

b. UPMC-Paris 6, Institut d'Alembert, Case 162, 4 Place Jussieu, 75252 Paris cedex 5, France

c. Université de Lille Nord de France, F-59000 Lille, France

## Résumé :

Cet article présente les résultats d'une étude expérimentale visant à caractériser l'écoulement autour d'un chalut de fond. L'écoulement autour de la structure est déterminé à partir de mesures PIV. Le post traitement de ces mesures par décomposition orthogonale aux valeurs propres permet : de caractériser le développement de la couche limite sur la partie horizontale de la structure poreuse et de mettre en évidence les caractéristiques spatio-temporelles des structures tourbillonnaires présentes dans l'écoulement turbulent derrière la partie finale du chalut en mouvement.

## Abstract :

Flow field measurements around a bottom trawl are conducted using Time Resolved PIV method. Using the Proper Orthogonal Decomposition (POD) for such investigation, it is demonstrated the effectiveness of this procedure to characterize the boundary layer above the horizontal part of this porous structure and to extract the large scale spatial flow structure and their associated frequencies in the wake of the cod-end.

**Mots clefs :** Chalut de fond, PIV, POD, Couche limite, Sillage, Détachement tourbillonnaire

## 1 Introduction

Les structures poreuses utilisées pour la pêche et en particulier les chaluts sont responsables de la plus grande partie de la consommation de carburant. Il a été montré que les chaluts de fond sont à l'origine de 60% de la traînée lors d'une opération de pêche (voir la répartition Figure 1). Afin de développer des outils de conception de chalut permettant de réduire au maximum la traînée de l'engin, le projet HydroPêche [1] pour lequel différents aspects sont abordés, tant expérimentalement que numériquement, a été initié.

Cet article présente une partie de l'étude expérimentale réalisée au sein de ce projet pour caractériser l'écoulement autour des engins de pêche. Cette étude vise à obtenir des bases de données expérimentales et à développer/utiliser des outils mathématiques pour les analyser afin de caractériser le comportement hydrodynamique des différentes parties de la structure (parties horizontales présentant un développement de couche limite, cul du chalut générant des détachements tourbillonnaires). Pour ce faire, des mesures par vélocimétrie par images de particules (PIV) et des post-traitements par décomposition orthogonale aux valeurs propres (POD) ont été effectuées dans différents plans autour d'un chalut de fond. En particulier, sur le dos du chalut (partie horizontale supérieure à l'entrée de l'engin) pour caractériser le développement de la couche limite et autour/derrière le cul du chalut (partie sphérique finale de l'engin) pour étudier les détachements tourbillonnaires régissant la dynamique de la structure.

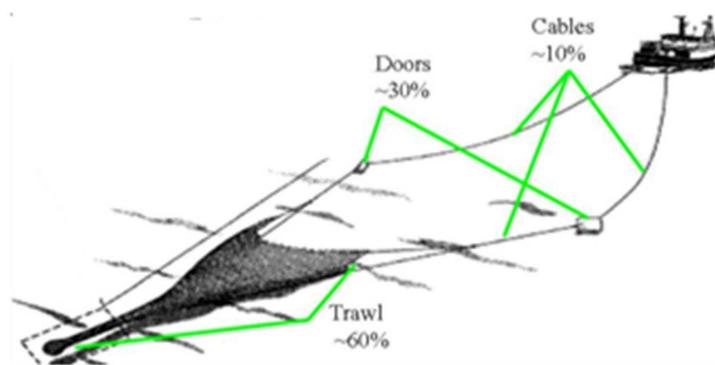


Figure 1. Répartition de la traînée sur un chalut de fond

## 2 Dispositif expérimental et techniques de mesure

Les essais expérimentaux ont été réalisés dans le bassin à houle et courant de l'Ifremer à Boulogne-sur-Mer. Ce bassin mesure 18 m de long, 4 m de large et 2 m de profondeur. Il permet d'effectuer des essais à des vitesses allant de 0.2 à 2,2 m/s, avec un taux de turbulence de l'écoulement incident entre 5 à 28%.

Pour étudier l'écoulement autour d'un chalut de fond, nous avons utilisé une maquette au 1/10 d'un chalut de type professionnel (voir Figure 2). Cette maquette mesure 4 m de long et est constituée d'une alèse de 8 mm de côté de maille pour un diamètre de fil de 0.5 mm. Le cul du chalut a été rempli par des boules poreuses occupant un volume de diamètre  $d = 0.22$  m, afin de représenter une prise équivalente aux essais précédemment réalisés sur un cul de chalut rigide [2]. La maquette est maintenue au fond du bassin à l'aide d'un gréement traditionnel à deux panneaux, les mouvements du chalut étant ainsi non contraints. Les essais ont été effectués à une vitesse de veine de 0,42 m/s et un taux de turbulence de 5%.

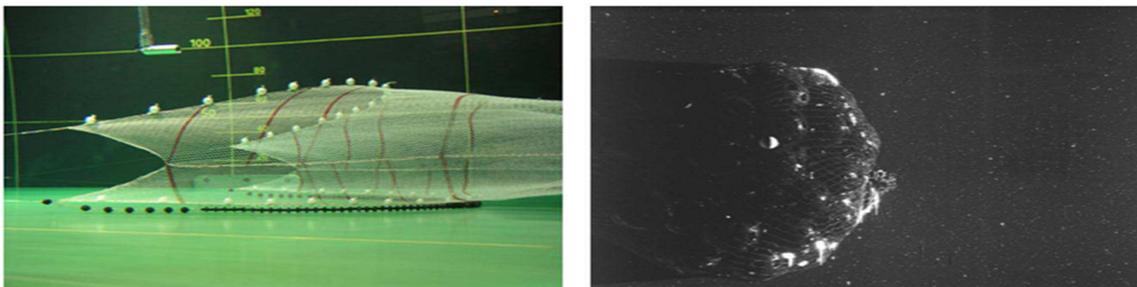


Figure 2. Chalut de fond : partie plane (à gauche), image PIV cul du chalut (à droite)

Le bassin de Boulogne-sur-Mer dispose d'un système PIV permettant de mesurer des champs de vitesses bidimensionnels. Ce système est composé d'une caméra CCD de résolution 1600 x 1200 pixels, équipée d'un objectif de 60 mm et d'un laser du type Nd-Yag de 15 mJ. Le logiciel de traitement d'images DynamicStudio de DANTEC permet de piloter et synchroniser l'ensemble laser/caméra et de mesurer les champs de vitesses instantanés, l'écoulement étantensemencé à l'aide de billes de verre de 15 $\mu$ m de diamètre.

Quatre plans PIV de 383.54 x 143.4 mm sur la partie horizontale et un plan de 383.54 x 287.65 mm autour du cul du chalut ont été considérés (Figure 3). Dans chacun de ces plans, des séries de 500 ou 800 images ont été acquises à des fréquences de 4 Hz ou 15 Hz. Pour déterminer l'écoulement sur le dos du chalut, nous avons appliqué la méthode adaptative multipasse sur des zones d'interrogation de 16 x 16 pixels, en imposant un recouvrement de 50%. Le nombre de points de maillage PIV ainsi obtenu est de  $N_x \times N_y = 199 \times 74$  points. La méthode de corrélation croisée classique [3] a quant à elle été appliquée pour déterminer l'écoulement autour et dans le sillage du cul de chalut sur des zones d'interrogation de taille 32 x 32 pixels avec un recouvrement de 50%. Le maillage obtenu est de  $N_x \times N_y = 99 \times 74$  points.

On désignera par  $(u,v)$  respectivement les composantes longitudinale et transversale de l'écoulement.

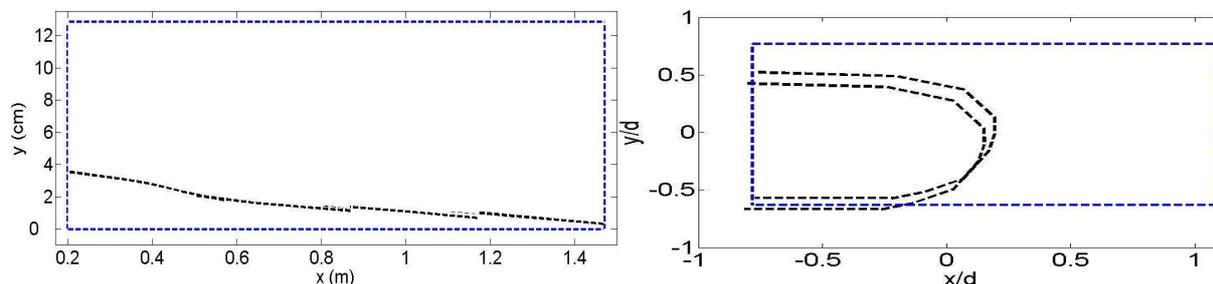


Figure 3. Plans de mesure sur le dos de la maquette (à gauche) et autour du cul de chalut (à droite). Pointillés noirs : position moyenne du filet, pointillés bleus : limite des plans PIV

## 3 Décomposition orthogonale aux valeurs propres

En mécanique des fluides, la POD a été introduite par Lumley [4] afin d'identifier les structures cohérentes au sein d'un écoulement turbulent. Cette méthode est basée sur un critère énergétique. Elle consiste à déterminer une base de modes propres sur laquelle nous pouvons reconstruire le processus aléatoire à approcher (champs de vitesse, pression...). Les modes de la base POD sont déterminés à partir du tenseur corrélation (temporelle, spatiale) des vitesses. Selon la méthode de corrélation utilisée on peut distinguer deux approches : l'approche classique et l'approche Snapshot.

Dans le cadre de cette étude, l'approche POD utilisée est celle introduite par Sirovich [5] appelée POD Snapshot. Le principe consiste à calculer les corrélations temporelles des champs de vitesse comme suit :  $C(t, t') = \langle \mathcal{U}(\mathbf{x}, y, t) \mathcal{U}(\mathbf{x}, y, t') \rangle$ ,  $\langle \rangle$  indiquant l'opérateur de moyenne spatiale, et à résoudre le problème aux valeurs propres :  $C\mathbf{a} = \lambda\mathbf{a}$ . On obtient alors un ensemble fini de  $N_{\text{mod}}$  vecteurs propres et dans notre cas,  $N_{\text{mod}} = N_t$ . Les vecteurs propres  $\mathbf{a}$  sont appelés coefficients temporels de la POD et les valeurs propres  $\lambda$  représentent par définition l'énergie de l'écoulement incluse dans les modes POD. Les modes spatiaux,  $\phi^n(\mathbf{x}, y)$  sont déduits par la projection des champs de vitesse sur le coefficient temporel correspondant  $\mathbf{a}^{(n)}(t)$ . Les champs de vitesse sont reconstruits comme suit :

$$u(x, y, t) = \sum_{n=1}^{N_t} a^n(t) \phi^n(x, y) \quad (1).$$

L'équation (1) permet de reconstruire les champs de vitesse sur un nombre fini  $N$  de modes qui est choisi en fonction du niveau d'énergie que l'on désire représenter [6, 7]. Dans ce travail, la décomposition de Reynolds de la vitesse  $u = u' + \bar{U}$  a été utilisée,  $u$  étant la vitesse instantanée,  $u'$  la vitesse fluctuante et  $\bar{U}$  la vitesse moyenne.

Dans ce qui suit (partie 4), nous avons appliqué la POD directement à partir des champs instantanés afin d'approcher le champ moyen sur la nappe d'alèse en mouvement. Ensuite (partie 5), nous avons appliqué la POD à partir des champs fluctuants  $u' = u - \bar{U}$  pour extraire les structures cohérentes à grande échelle de l'écoulement turbulent derrière le cul du chalut.

#### 4 Couche limite sur une nappe d'alèse

La structure étudiée ici est souple et poreuse. Les phénomènes d'interaction fluide/structure rencontrés sont par conséquent prédominants et induisent des mouvements à la structure. Pour caractériser la couche limite se développant sur le dos du chalut, nous avons mis en œuvre la POD afin d'approcher l'écoulement moyen pour chaque champ instantané. Nous avons projeté chaque champ instantané sur les deux premiers modes POD pour obtenir le champ moyen associé, correspondant à une position instationnaire de la structure. La Figure 4 montre les profils de vitesses moyennes instantanés approchés par POD dans un des plans PIV.

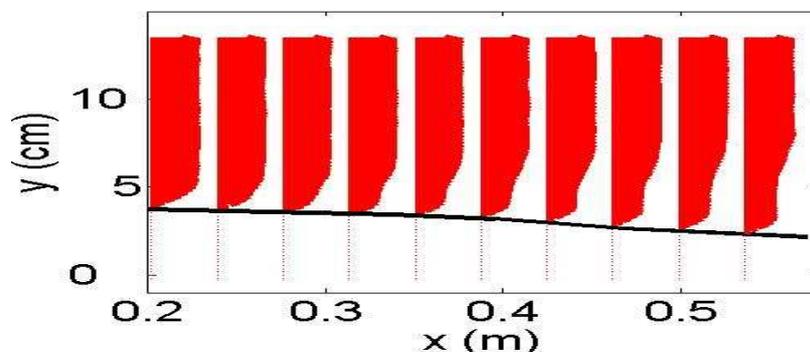


Figure 4. Profils de vitesse moyenne POD (ligne noire : position de la structure)

A partir de ces champs moyens POD, les différents paramètres caractéristiques d'une couche limite peuvent être calculés. L'épaisseur de la couche limite  $\delta(x)$  est définie ici comme étant la distance à laquelle on retrouve 90% de la vitesse de l'écoulement incident. Le choix de 90 % se justifie par la résolution spatiale relativement élevée du maillage PIV (pas de 1.9 mm). Pour chaque position instantanée de la structure, l'épaisseur a été calculée aux points du maillage PIV en utilisant le champ moyen instationnaire associé à la position. Les évolutions temporelles de l'épaisseur de la couche limite et de la position moyenne de la structure à  $x = 0.65$  m sont présentées Figure 5. Ces résultats montrent le caractère fluctuant de la couche limite imposé par les mouvements de la structure. A cette position, l'épaisseur de la couche limite présente des variations du même ordre de grandeur que les mouvements de la structure :  $\delta(x) \in [0.03; 0.056 \text{ m}]$  pour une valeur moyenne de 0.048 m, alors que la structure oscille de  $\pm 0.0125$  m autour de sa position moyenne.

Afin de caractériser le développement moyen de la couche limite sur le dos du chalut, la valeur moyenne de la couche limite a été calculée sur la série des 500 images PIV en chaque point du maillage. L'évolution

moyenne ainsi obtenue, présentée sur la Figure 6 pour des abscisses comprises entre 0.2 et 1.5 m, montre un épaissement plus rapide que celui obtenu dans le cas d'une plaque plane sans incidence [8].

A partir de ces données PIV, il est également possible de calculer les épaisseurs définissant les différentes régions de la couche limite ( $\delta^*(x)$  et  $\theta(x)$ ) et dont les évolutions sont présentées Figure 6 pour l'ensemble de la partie horizontale rencontrée sur le dos d'un chalut de fond avec :

$$a/ \delta^*(x) = \int_0^{\delta(x)} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad \text{l'épaisseur de déplacement;}$$

$$b/ \theta(x) = \int_0^{\delta(x)} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad \text{l'épaisseur de la quantité de mouvement.}$$

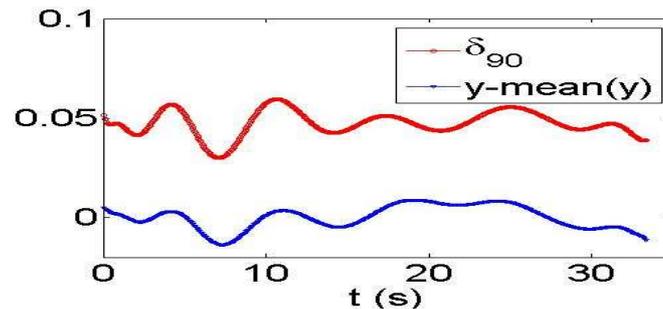


Figure 5. Evolutions temporelles de l'épaisseur de la couche limite et de la position de la structure à  $x = 0.65$  m

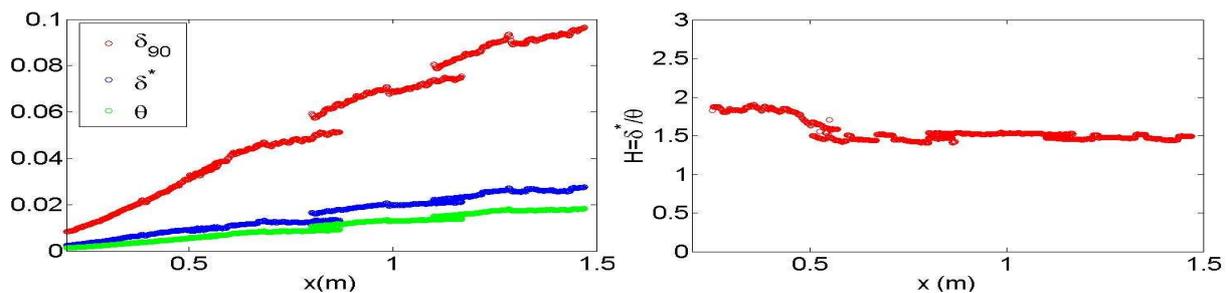


Figure 6. Evolution de la couche limite à gauche et du facteur de forme à droite

Le facteur de forme défini comme étant le rapport des deux grandeurs précédentes :  $H = \frac{\delta^*}{\theta}$  est quasiment constant et égale à 1.5 à partir de  $x = 0.5$  m (figure 6, droite). Pour une paroi solide, il a été montré que le facteur de forme est égal à 2.5 pour un écoulement de couche limite laminaire [8] et égal à 1.3 pour une couche limite turbulente [9,10]. Pour le cas d'une paroi poreuse, nous obtenons une valeur du facteur de forme proche de celle du facteur de forme pour une couche limite turbulente.

Une première estimation du coefficient de frottement  $C_f$  sur la paroi peut donc être calculé en utilisant la formule de Blasius pour le cas d'une couche limite turbulente sur plaque plane [9]. La vitesse de frottement définie par :  $u_\tau = \sqrt{\frac{c_f}{U}}$  peut également être calculée afin de déterminer le profil de vitesse

adimensionnalisé dans la direction orthogonale selon l'expression :  $U^+ = \frac{u}{u_\tau}$ ,  $Y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu}$  où  $\nu$  est la viscosité cinématique de l'eau.

La Figure 7 montre le profil de vitesse ainsi obtenu pour  $100 < Y^+$ , à l'abscisse  $x = 0.3$  m où  $R_\theta = 1200$ , basé sur l'épaisseur  $\theta$ . A l'approche de la paroi nous ne disposons pas suffisamment de données pour quantifier précisément l'écoulement du fait des mouvements verticaux de la paroi et de la méthode utilisée pour accéder au champ moyen. Néanmoins, le profil ainsi obtenu présente une zone logarithmique où  $U^+ \approx Y^+$  pour  $100 < Y^+ < 600$ . Les profils de vitesse dans une couche limite sont en général caractérisés par une région logarithmique où les effets de viscosité sur la paroi dominent. Des études expérimentales et numériques permettant de caractériser cette région de la couche limite sur une paroi

solide [9,10] montrent que cette région est influencée par l'augmentation de  $R_\theta$  sur la paroi pour :  $50 < Y^+ < 1000$ . De nouvelles analyses sont en cours pour affiner ces résultats et mieux appréhender l'effet du mouvement de la structure sur le développement spatial de la couche limite.

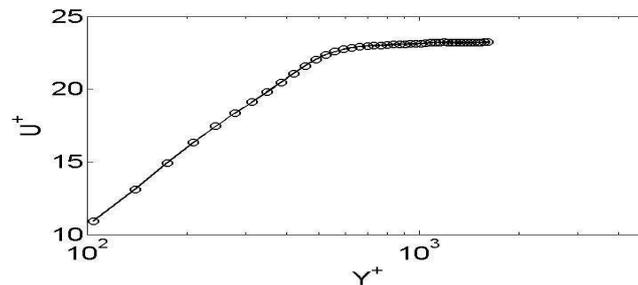


Figure 7. Moyenne du profil de vitesse à  $x = 0.3$  (nombre de Reynolds local  $R_\theta = 1200$ )

## 5 Ecoulement turbulent dans le sillage cul du chalut

L'écoulement moyen dans le sillage proche du cul du chalut de fond a été calculé à partir des mesures PIV. La Figure 8 montre les lignes de courant du champ moyen pour une série de 800 champs PIV. Ce champ moyen présente des caractéristiques similaires à celles obtenues pour un écoulement moyen derrière un cul du chalut rigide et fixe [11]. La zone de décollement derrière le cul de chalut est symétrique et se caractérise par la présence de deux tourbillons qui résultent principalement de la moyenne de tourbillons alternés de Von Karman. L'énergie cinétique turbulente présentée figure 6 met en évidence les zones de forts cisaillements dans le sillage proche de la structure.

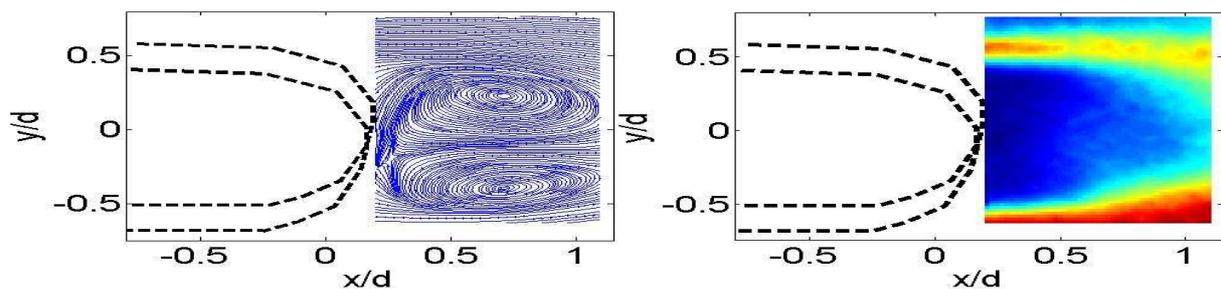


Figure 8. Lignes de courant de l'écoulement moyen derrière cul du chalut en mouvement, pointillés présentent position max et min de la structure (à gauche), énergie cinétique turbulente (à droite)

La topologie de l'écoulement moyen derrière le cul du chalut et le nombre de Reynolds élevé ( $Re = 80000$ ) montrent que le régime est turbulent et se caractérise par des lâchers tourbillonnaires. L'analyse spectrale présentée sur la figure 9 (série temporelle de la composante  $u$  à  $x/d = 1.02$  et spectre associé) permet de décrire le détachement tourbillonnaire dans le sillage de ce type de structure. Ce spectre met en évidence un pic dominant de fréquence  $f = 0.21$  Hz, correspondant au passage des tourbillons à cette abscisse pour un nombre de Strouhal de  $S_t = \frac{fd}{U} = 0.16$ .

Le nombre de Strouhal obtenu pour ce cul de chalut poreux et en mouvement est plus faible que celui obtenu pour un cul de chalut rigide et fixe [11] ou celui obtenu pour un cylindre [12] qui est d'ordre 0.2. Cela peut se justifier par le faible nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement mais aussi par les mouvements de la structure.

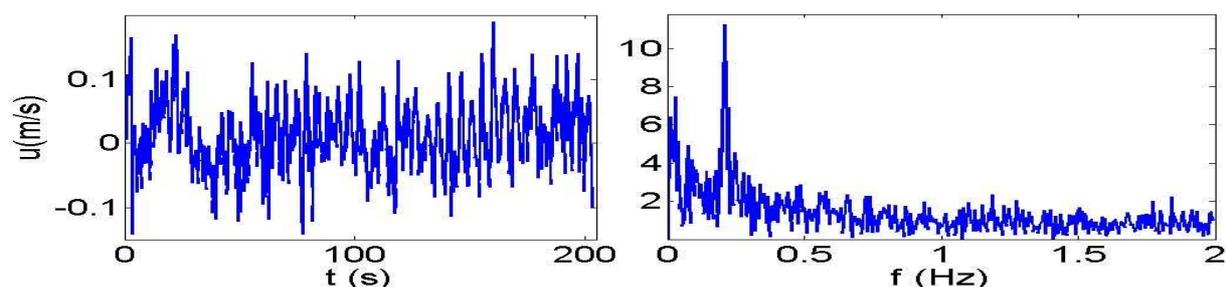


Figure 9. Signal PIV à l'abscisse  $x/d = 1.02$  à gauche et spectre associé à droite

Les structures tourbillonnaires présentes dans le sillage du cul de chalut peuvent être extraites en appliquant la POD aux données précédentes. La répartition énergétique des modes POD est présentée sur la Figure 10. Le premier mode POD correspond à 30 % d'énergie et les 3 premiers modes à 45 %. Le spectre du signal  $u$  projeté sur les 3 premiers modes à l'abscisse  $x/d = 1.02$  met en évidence la fréquence de détachement tourbillonnaire détectée à partir du signal PIV brut. Ceci signifie que les 3 premiers modes permettent d'extraire la fréquence qui caractérise le détachement tourbillonnaire.

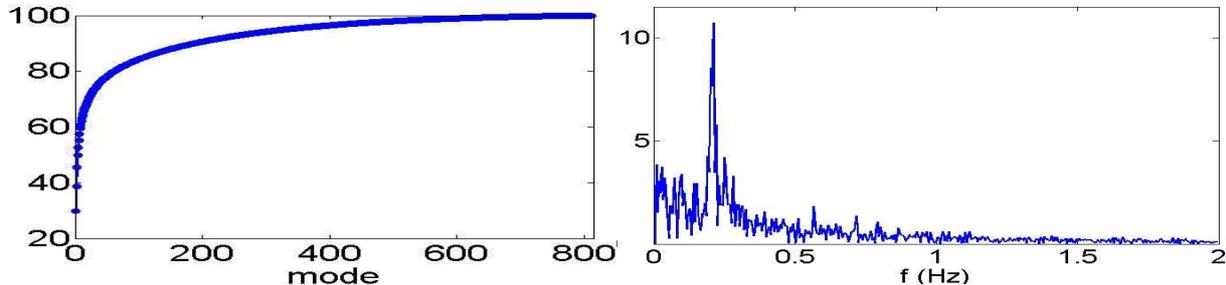


Figure 10. Répartition énergétique aux modes POD (à gauche) et spectre du signal à  $x/d = 1.02$  projeté sur les 3 premiers modes POD (à droite)

## 6 Conclusions

Les caractéristiques de l'écoulement sur les différentes parties d'un engin de pêche ont été étudiées à partir de mesures PIV. L'évolution de la couche limite sur la partie plane du chalut de fond a été caractérisée à partir d'analyses POD pour approcher le champ moyen. Les paramètres de cette couche limite ont ainsi pu être déterminés, montrant le régime turbulent de l'écoulement (facteur de forme 1.5). Les caractéristiques de l'écoulement moyen dans le sillage de la partie finale du chalut s'apparentent à celles de l'écoulement moyen derrière un cul de chalut fixe et rigide ou derrière une structure de forme cylindrique.

Les lâchers tourbillonnaires dans le sillage de cette structure sont caractérisés par un nombre de Strouhal de 0.16. L'analyse POD a permis d'extraire les caractéristiques spatio-temporelles des structures à grandes échelles. Ces bases de données expérimentales permettent de mieux appréhender les phénomènes en présence et serviront d'éléments de validation des développements numériques réalisés en parallèle dans le cadre du projet HydroPêche.

## References

- [1] Germain G., HydroPêche: "a way to improve energy efficiency of fishing devices," 1<sup>st</sup> symposium E-Fishing, 2010
- [2] Pichot G., Germain G., Priour D., On the experimental study of the flow around a fishing net. Eur. J. Mech. B/Fluids, 103:116, 2009
- [3] Adrian R., Twenty years of particle image velocimetry. Exp. Fluids 29,159:169, 2005
- [4] Lumley J., The structure of inhomogeneous turbulent flows. Atmospheric Turbulence and Radio wave Propagation, Vol. I A.M. Yaglom and Tararsky, pp. 166-178, 1967
- [5] Sirovich H., Turbulence and the dynamics of coherent structures, part 1 : Coherent structures, Quart. Appl. Mech. Vol. 45-3, pp. 561-590, 1987
- [6] Druault P., Guibert P., Alizon F., Use of proper orthogonal decomposition for time interpolation from PIV data. Exp. Fluids 39, 1009:1023, 2005
- [7] Druault P., Chaillou C., Use of proper orthogonal decomposition for reconstructing the 3d cylinder mean flow field from PIV data. C. R. Mec. 335 (1), 42:47, 2007
- [8] Xiaohua Wu., Parviz M., Direct numerical simulation of turbulence in a nominally zero-pressure-gradient flat-plate boundary layer, Fluid Mech, 630, 5:41, 2009
- [9] Spalart P. R, Direct simulation of a turbulent boundary layer up to  $R=1410$ , Fluid Mech. 187, 61:98, 1988
- [10] Schlatter P, Li Q., Brethouwer G., Johansson A.V., Henningson D.S., Simulation of spatially evolving turbulent boundary layers up to  $Re=4300$ , Heat and Fluid Flow, 31, 251-261, 2010
- [11] Bouhoubeiny E., Germain G, Druault P., Time-Resolved PIV investigations of the flow field around cod-end net structures, Fisheries Research, 108, Issues 2-3, 344-355, 2011
- [12] Williamson C., Govardhan R., Vortex induced vibrations. Ann. Rev. Fluid Mech, 36, 413:455, 2004