

## MESURES DE PIV 2D ET DE STEREO-REFRACTION SUR UNE NAPPE LASER HORIZONTALE. APPLICATION A LA MESURE D'ONDES DE BATILLAGE EN LABORATOIRE

### 2D PIV AND STEREO-REFRACTION MEASUREMENTS ON A HORIZONTAL LASER SHEET; APPLICATION TO THE MEASUREMENT OF WAVES IN A CONFINED WATERWAY

P. NIEUTIN<sup>(1)</sup>, G. GOMIT<sup>(1)</sup>, P. BRAUD<sup>(1)</sup>, R. BELLANGER<sup>(1)</sup>, D. CALLUAUD<sup>(1)</sup>, G. PINEAU<sup>(1)</sup>

[pablo.nieutin.redon@univ-poitiers.fr](mailto:pablo.nieutin.redon@univ-poitiers.fr) ; [guillaume.gomit@univ-poitiers.fr](mailto:guillaume.gomit@univ-poitiers.fr) ; [patrick.braud@univ-poitiers.fr](mailto:patrick.braud@univ-poitiers.fr) ; [romain.bellanger@univ-poitiers.fr](mailto:romain.bellanger@univ-poitiers.fr) ; [damien.calluauud@univ-poitiers.fr](mailto:damien.calluauud@univ-poitiers.fr) ; [gerard.pineau@univ-poitiers.fr](mailto:gerard.pineau@univ-poitiers.fr)

<sup>(1)</sup> Institut Pprime, département fluides, thermique et combustion, équipe Hydée, Poitiers

#### Résumé

La navigation fluviale a un impact encore mal connu sur les berges des rivières françaises. Dans le but de quantifier cet impact, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance de l'écoulement qui a lieu autour des navires fluviaux, et près des berges des cours d'eau dans lesquels ils évoluent. Pour ce faire, des essais expérimentaux en bassin de traction ont été réalisés à l'Institut Pprime, avec pour objectif de coupler deux méthodes de mesures : de la vélocimétrie par image de particules pour déterminer la vitesse du fluide, et de la stéréo-réfraction afin de connaître la déformée de la surface libre dans le sillage d'une maquette de navire. Ces mesures permettent de mieux comprendre la dynamique de l'écoulement étudié.

#### Summary

The impact of river navigation on the banks of French rivers is still poorly understood. In order to quantify this impact, it is necessary to have a good understanding of the flow that takes place around river vessels, and close to the river banks in which they operate. To this end, experimental trials were carried out at the Institut Pprime in a towing tank, with the aim of coupling two measurement methods: particle image velocimetry to determine fluid velocity, and stereo-refraction to determine the deformation of the free surface in the wake of a ship model. These measurements provide a better understanding of the dynamics of the flow studied.

## **I – Introduction**

La navigation fluviale s'est démocratisée pour les transports de marchandises et le tourisme, conduisant de nombreuses villes à aménager les berges des cours d'eau. Les phénomènes hydrodynamiques générés par les navires peuvent causer de la houle, des courants ou faire varier le niveau de l'eau, contribuant à la dégradation des berges. Ces effets sont influencés par plusieurs facteurs, tels que la forme du navire, la géométrie du cours d'eau, le courant, le type de propulsion et la vitesse du navire. Il est donc crucial de réaliser des études approfondies intégrant ces paramètres pour comprendre leur impact sur l'érosion et la dégradation des berges, des habitats clés pour la biodiversité environnante.

Ce papier présente une campagne expérimentale menée dans le bassin des carènes de l'Institut Pprime s'intégrant dans cette optique, similaire à celle présentée dans [1], [2]. L'objectif de cette expérience est double : mesurer la déformée de la surface libre lors du passage d'une maquette dans un canal hydraulique confiné, et mesurer la vitesse des courants au sein du fluide autour de la maquette.

Pour cela, deux types de mesures ont été réalisées en parallèle : de la PIV 2D, sur un plan horizontal, ainsi que de la stéréo-réfraction. L'originalité de ces mesures réside dans le fait que le motif utilisé pour la stéréo-réfraction correspond aux particules éclairées par une nappe laser sur le plan horizontal servant à faire les mesures de PIV 2D.

## **II – Dispositif expérimental**

### **II – 1 Canal de traction**

Le bassin de traction de l'Institut Pprime (Figure 1 et 2) mesure 35 m de long. Il a la particularité d'être équipé de hublots sur toute sa longueur. Ces derniers sont placés au fond du canal ainsi que sur l'un de ces côtés, permettant un accès optique sous différents angles.

Le canal a une largeur d'1.5 m. Les hublots latéraux se trouvant sur la partie verticale de la paroi latérale, un double-fond a été installé pour permettre d'observer la maquette tractée à hauteur de hublot, tout en faisant en sorte d'avoir une faible hauteur d'eau. Le double fond est transparent au niveau de la zone de mesure, afin de permettre un accès optique depuis la fosse située sous le canal.

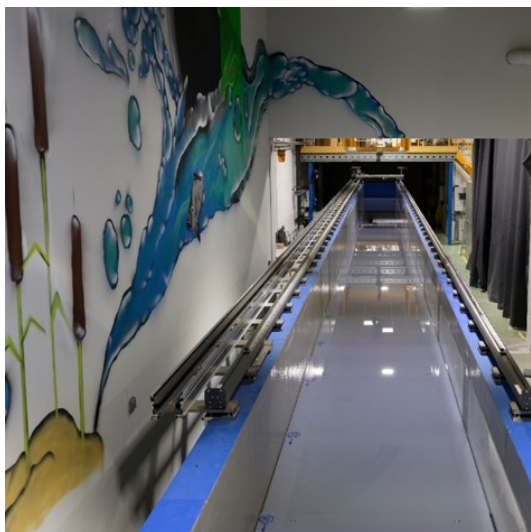


Figure 1 : canal de traction de l'Institut Pprime



Figure 2 : chariot de traction et maquette utilisée

## II – 2 Maquette utilisée

La maquette tractée, sélectionnée pour sa similarité avec les péniches évoluant dans les cours d'eau français, est visible sur la Figure 3. Il s'agit d'une carène de Wigley [3], dont le coefficient  $n$  est égal à 8. Les caractéristiques de la maquette sont détaillées dans la Table 1.



Figure 3 : maquette tractée

Table 1 : Caractéristiques de la maquette tractée

| Caractéristique         | Valeur  |
|-------------------------|---------|
| Longueur (L)            | 1.2 m   |
| Maitre-bau (B)          | 0.18 m  |
| Hauteur totale          | 0.15 m  |
| Tirant d'eau (T)        | 0.075 m |
| Masse                   | 14.4 kg |
| Vitesse de traction (V) | 0.4 m/s |

La maquette est maintenue en encastrement avec le chariot de traction. Ainsi, durant une expérience, le seul degré de liberté de la maquette est la translation dans la direction d'avance de la maquette. La maquette accélère linéairement sur quatre mètres jusqu'à la vitesse de traction  $V=0.4$  m/s. Elle évolue à vitesse constante sur une distance de dix-huit mètres avant de décélérer de nouveau sur les quatre derniers mètres.

## II – 2 Méthode de mesure

Cette campagne d'essais couple des mesures de PIV 2D-2C avec des mesures de stéréo-réfraction. Ainsi, elle permet d'obtenir les deux composantes de la vitesse du plan horizontal ainsi qu'une reconstruction de la surface libre autour du navire. Pour cela, une nappe laser est utilisée. Elle est générée à l'aide d'un laser rapide à lumière pulsée *Terra PIV 527-100-M* de la société *Continuum*. Ce laser dispose de deux cavités pouvant tirer de manière indépendante, avec un réglage de la puissance délivrée. Les deux cavités du laser sont couplées pour augmenter la puissance de ces impulsions et ainsi obtenir un meilleur contraste entre les particules fluorescentes (particules de 50  $\mu\text{m}$  dopées avec de la G-Rhodamine) et le fluide. La nappe laser horizontale se trouve 4 cm au-dessus du fond. Cette position a été choisie de sorte que l'interface de la surface libre ne passe jamais sous la nappe laser, tout en étant le plus proche possible de la surface libre, afin d'éviter la création de caustiques. La nappe laser est créée par une source laser ponctuelle passant à travers une lentille cylindrique, de longueur d'onde 527 nm.

Deux caméras sont nécessaires pour effectuer ce type de mesures, mais quatre ont été utilisées durant cette campagne expérimentale. La première est située dans la fosse sous le canal. Elle enregistre les motifs aléatoires générés par les particules fluorescentes se situant dans la nappe laser horizontale non déformés par les variations de la surface libre. Ces images servent à calculer les vitesses en 2D,

et forment les images de références nécessaires pour la stéréo-réfraction. Les trois autres caméras sont suspendues au-dessus du canal, et enregistre ce même motif, cette fois-ci déformé par la présence de la surface libre. Le dispositif expérimental est schématisé sur les figures 4 et 5.

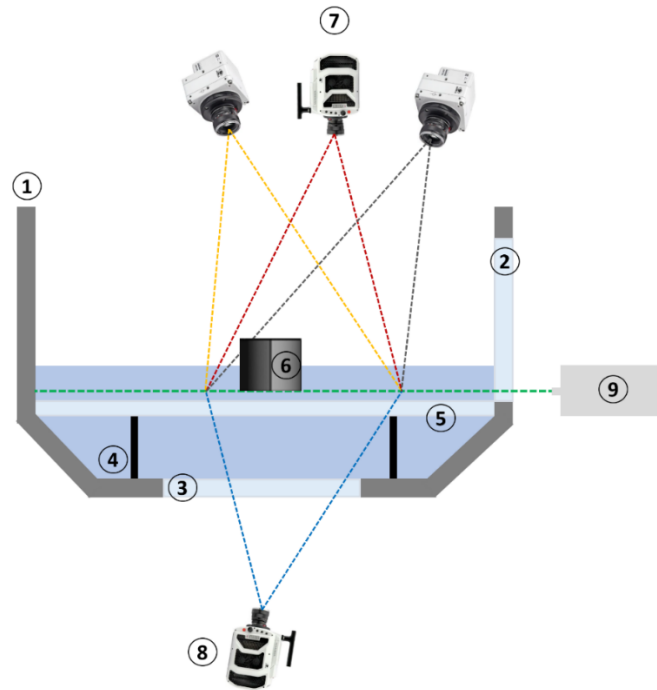


Figure 4 : vue schématique du dispositif expérimental - Plan transverse à la direction de déplacement de la maquette. (1) canal (2) hublot latéral (3) hublot du fond du canal (4) caisson d'étanchéité (5) double-fond transparent (6) maquette CWn8 (7) caméras suspendues (8) caméra sous le canal (9) Laser

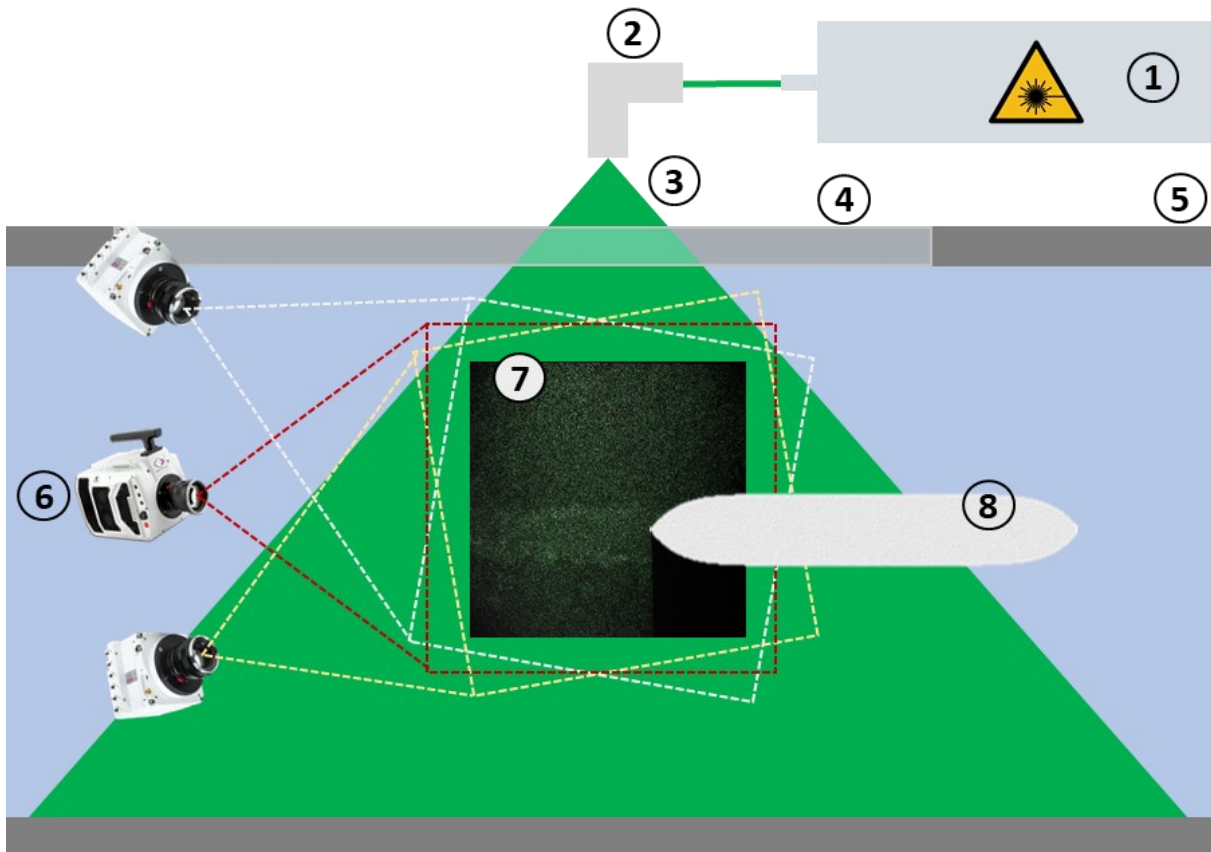


Figure 5 : vue schématique du dispositif expérimental - vue du dessus. (1) Laser à double cavité (2) coude + lentille cylindrique (3) nappe laser (4) hublot latéral (5) paroi du canal (6) caméras suspendues au-dessus du canal (7) zone de mesure (8) maquette CWn8

### III – Résultats

Le dispositif de mesure étant fixe par rapport au canal, il est donc en mouvement par rapport à la maquette tractée. Il est donc possible, en faisant l'hypothèse que le sillage et l'écoulement sont stationnaires, de les combiner afin de reconstruire la surface libre et les vitesses tout autour du navire, comme le montre la Figure 6. Chaque point ainsi obtenu est issu d'une moyenne de 26 points pour la stéréo-réfraction, et de 35 points pour la PIV 2D.

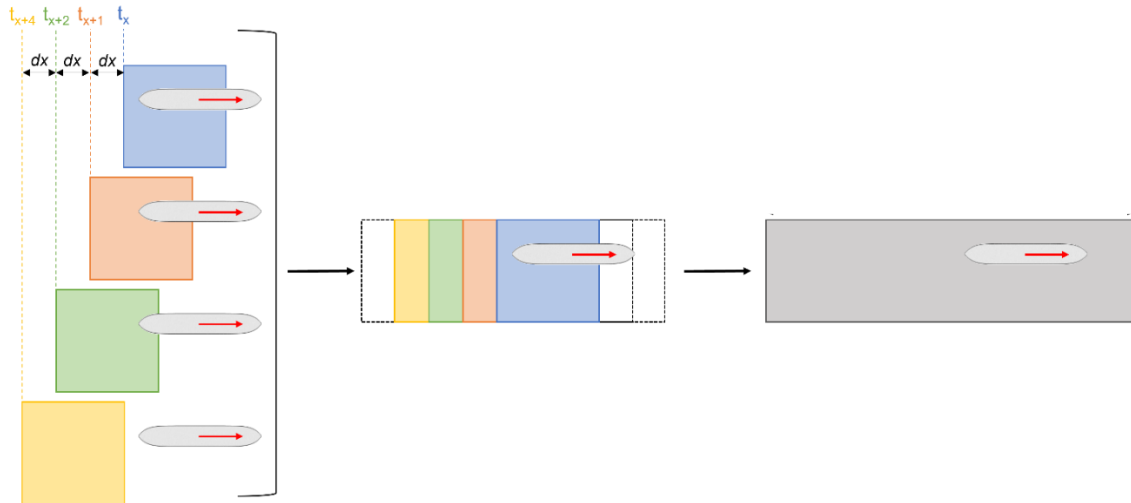


Figure 6 : Méthode de reconstruction des champs de vitesses et hauteurs de surface libre. Couleurs : champs bruts ; gris : champ reconstruit

Cette méthode de mesure ne permet pas d'obtenir la hauteur de surface libre et les vitesses dans la zone proche de la paroi latérale du canal, à cause de la présence de la structure qui soutient le double fond du canal de traction. Cela constitue une limitation importante, en particulier pour la présente étude, qui cherche à quantifier l'impact de la navigation fluviale sur les berges.

#### III – 2 PIV 2D

La Figure 7 montre un champ de vitesse instantané décomposé par composantes, situé juste derrière la poupe de la maquette. La trainée de sillage  $y$  est bien visible (en rouge sur le champ central). Le fluide est entraîné par le mouvement de la maquette, et des tourbillons sont observés sur le champ des vitesses transversales à la direction de déplacement de la maquette.

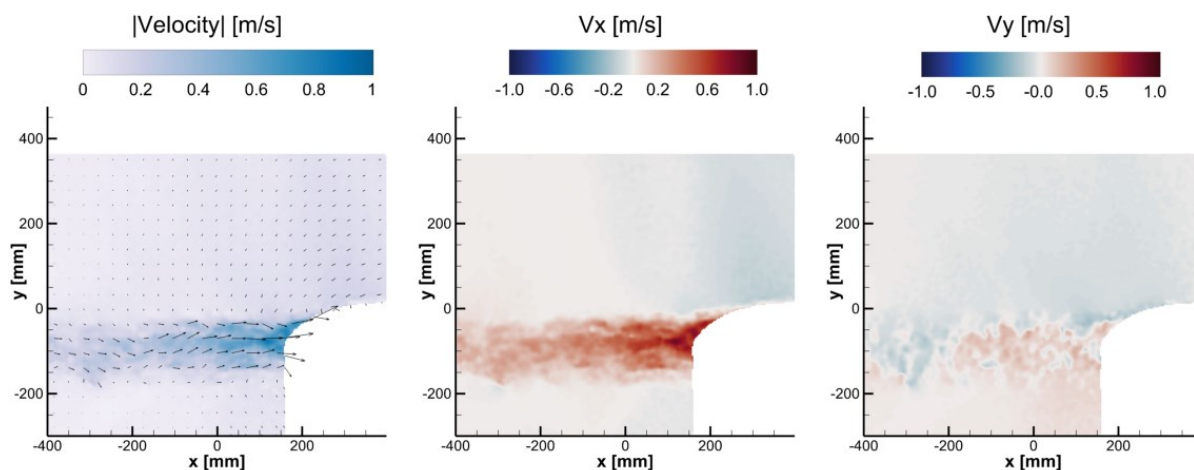


Figure 7 : champ de vitesse instantané décomposé par composantes

Une fois reconstruit avec tous les champs instantanés, le champ de la Figure 8 est obtenu. La dynamique de l'écoulement est alors bien visible. Dans un premier temps, la maquette « pousse le fluide » dans sa direction de déplacement. Par la suite, la vitesse du fluide s'inverse au droit du navire. Ce phénomène est connu sous le nom de courant de retour, et est détaillé dans la théorie de Schijf [4]. La vitesse du fluide s'inverse de nouveau après le passage de la poupe du navire, et la trainé de sillage précédemment introduite crée des mouvements importants et turbulents au centre de la voie d'eau. Le moyennage appliqué lors de la reconstruction lisse ces turbulences.

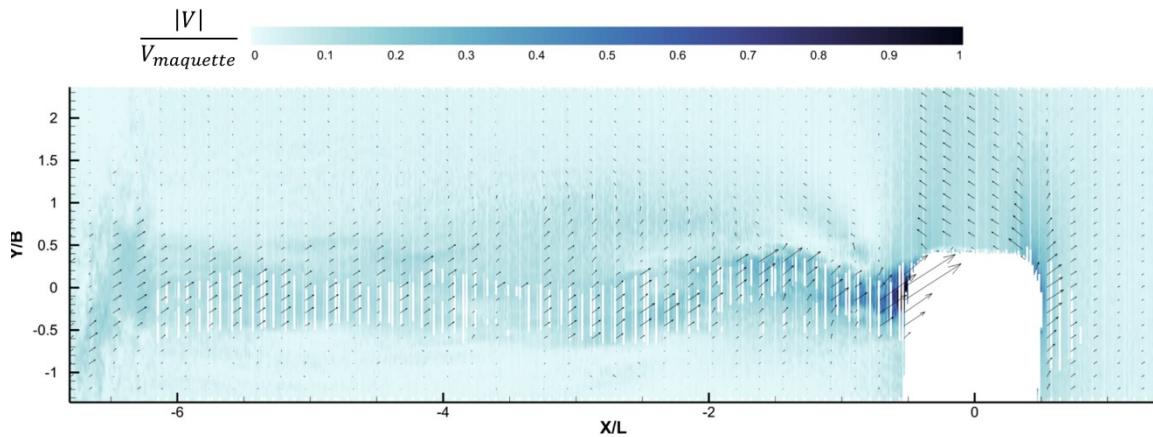


Figure 8 : Champ de vitesses moyennées autour de la maquette qui se déplace de gauche à droite

Des calculs d'incertitudes de mesure ont été réalisés, basés sur l'article [5]. Les différentes sources d'incertitudes expérimentales sont listées et quantifiées, puis ajoutées aux erreurs qui apparaissent durant la phase de corrélation de la PIV 2D. Parmi ces sources d'incertitudes, les plus influentes sont le déplacement des particules sur l'image en pixel, le rapport d'échelle évalué lors de la calibration et le désalignement entre l'angle de la caméra et la nappe laser. L'incertitude sur les vitesses calculées adimensionnée par la vitesse de traction peut être vue sur la figure ci-contre sur un champ situé juste derrière la maquette. Les incertitudes obtenues sont de l'ordre de 13% de la vitesse de navigation pour les plus importantes.

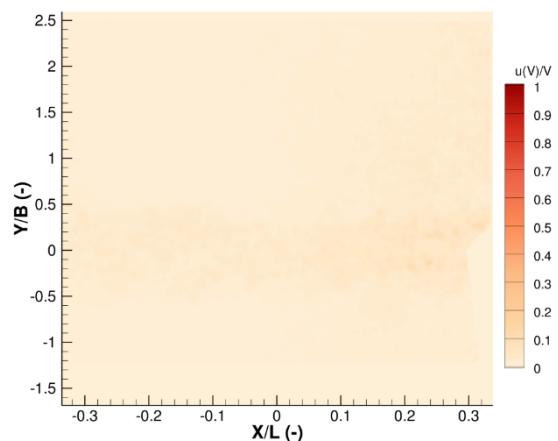


Figure 9 : incertitudes adimensionnées par la vitesse de navigation sur un champ type

### III – 2 Stéréo-réfraction

La Figure 10 présente la hauteur de surface libre adimensionnée autour de la maquette mesurée par stéréo-réfraction. Les zones blanches correspondent au chariot de traction et à la maquette. Le sillage généré par la maquette y est bien visible entre  $X/L = -4$  et  $X/L = -0.5$ . Un abaissement du plan d'eau au droit du navire, entre  $X/L = -0.5$  et  $X/L = 0.5$ , d'une valeur de 15% de la hauteur d'eau initiale.

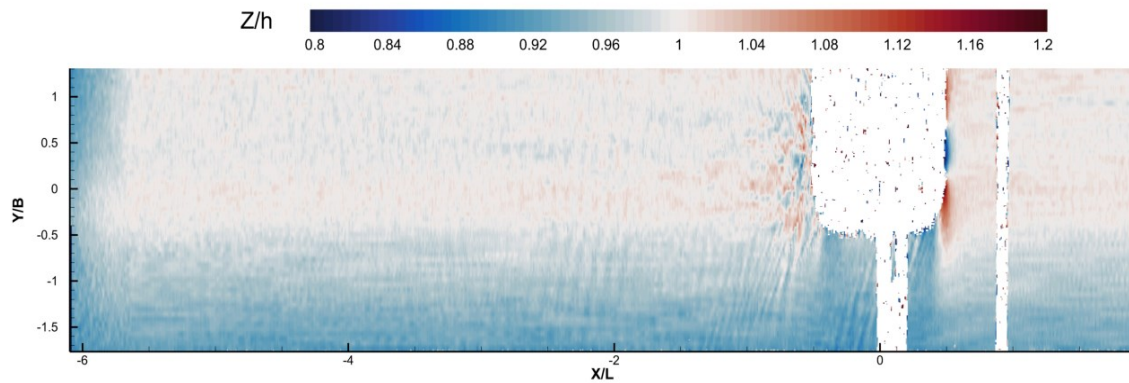


Figure 10 : hauteur de surface libre adimensionnée autour de la maquette mesurée par stéréo-réfraction

Il est plus délicat de déterminer l'incertitude élargie car cette méthode nécessite l'usage de quatre caméras, avec un processus mathématique complexe de reconstruction. Un paramètre calculé permet de se faire une première idée de la fiabilité des points mesurés : la grandeur  $R$ . Cette dernière compare les normales à la surface vues par les trois caméras. Si la surface reconstruite donne la même normale depuis les trois points de vue, on peut penser que la mesure est fiable. Les points dont la valeur de  $R$  est basse sont plus fiables que ceux ayant un  $R$  proche de 1. Cette valeur est tracée sur un champ dans la Figure 11. Pour le cas mesuré ici, les données collectées sont donc fiables. Des sources d'incertitudes sont tout de même identifiées. La phase de calibration en comporte plusieurs : des défauts potentiels sur la mire de calibration, des défauts d'alignement, notamment lors du déplacement de cette mire, ou encore l'utilisation de modèles de caméras simplifiés (ici, c'est un modèle sténopé qui a été utilisé). Des incertitudes apparaissent et se propagent durant la phase de corrélation, similairement à celle qui apparaissent pour la PIV 2D. Enfin, durant la phase de reconstruction d'un champ calculé, des erreurs supplémentaires peuvent s'ajouter aux autres, notamment de par la sensibilité du calcul à l'indice de réfraction.

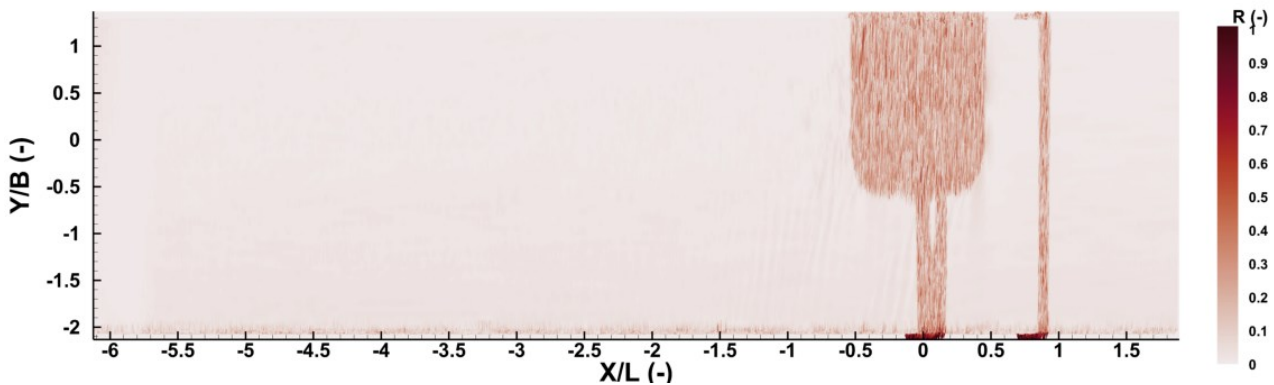


Figure 11 : Paramètre  $R$  sur un champ reconstruit obtenu par stéréo-réfraction après reconstruction

## IV – Conclusion

Le couplage des méthodes de mesures détaillées dans cet article permet d'obtenir les deux composantes de la vitesse du plan horizontal ainsi que la déformée de la surface libre autour de la maquette tractée. Les données ainsi obtenues permettent de comprendre la dynamique de l'écoulement autour de la maquette dans le canal de traction, dans l'objectif plus large de mieux comprendre les interactions entre les navires et les berges des cours d'eau français. L'influence de paramètres comme la hauteur d'eau, la vitesse de navigation ou encore la largeur de la voie d'eau peuvent être étudiées à l'aide de cette méthode de mesure.

## Références

- [1] G. Gomit, L. Chatellier, D. Callaud, et L. David, « Free surface measurement by stereo-refraction », *Exp. Fluids*, vol. 54, n° 6, p. 1540, mai 2013, doi: 10.1007/s00348-013-1540-4.
- [2] C. Caplier, G. Gomit, G. Rousseaux, D. Callaud, L. Chatellier, et L. David, « Calibrating and measuring wakes and drag forces of inland vessels in confined water in a towing tank », *Ocean Eng.*, vol. 186, p. 106-134, 2019.
- [3] W. C. S. Wigley, « Ship Wave Resistance. A comparison of mathematical theory with experimental results. », *Spring Meet. 67th Sess. Inst. Nav. Archit.*, vol. 14, p. 124-141, 1926.
- [4] J. Schijf, « Protection of embankments and bed in inland and maritime waters, and in overflows or weirs », *Proc. 17th Int. Navig. Congr. Lisbon*, 1949.
- [5] S. Ramalingam *et al.*, « Incertitude de mesures en stereovision : application a des mesures de stereo-PIV et de stereo-DIC », présenté à Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2022, 12 – 16 septembre 2022, Leuven, sept. 2022.