

## RECONSTRUCTION DE SURFACE LIBRE EN BASSIN D'ESSAIS PAR STEREO-VIDEO

### *STEREO-VIDEO FREE-SURFACE RECONSTRUCTION IN TEST TANK*

S. LE PAGE<sup>(1,3)</sup>, A. TASSIN<sup>(1)</sup>, J. CAVERNE<sup>(1)</sup>, B. MALAS<sup>(2)</sup>,  
G. DUCROZET<sup>(2)</sup>

*lepage.sacha@yahoo.fr ; atassin@ifremer.fr ; jcaverne@ifremer.fr ;  
bertrand.malas@ec-nantes.fr ; guillaume.ducrozet@ec-nantes.fr*

<sup>(1)</sup>Ifremer, RDT Research and Technological Development, F-29280, Plouzané, France

<sup>(2)</sup>Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, LHEEA, UMR 6598, F-44000, Nantes, France

<sup>(3)</sup>France Energies Marines, Plouzané, France

### Résumé

La problématique de la mesure d'élévation de surface libre est un enjeu majeur pour l'avancée des campagnes expérimentales en bassin d'essais hydrodynamiques. Aujourd'hui, ces mesures sont principalement réalisées à l'aide de sondes ponctuelles. Lorsque des mesures de champs sont nécessaires, cette méthode devient vite fastidieuse et coûteuse de par le déploiement de nombreuses sondes à houle. Nous présentons ici une nouvelle méthode de reconstruction de surface libre par stéréo-vidéo. A la différence d'autres méthodes de mesures par stéréo-vidéo existantes, la méthode proposée ne nécessite pas d'ensemencement de particules ou d'autres moyens invasifs pour créer la texture nécessaire à la corrélation entre les images provenant des deux caméras. La méthode réside dans la génération d'ondes courtes à la surface libre et l'utilisation d'un dispositif d'éclairage uniforme. Les ondes courtes créent une texture suffisamment fine permettant une réflexion diffuse de l'éclairage, favorisant ainsi la corrélation de pixels et la reconstruction par stéréo-vidéo. Des premiers essais, réalisés dans un canal à houle, ont permis d'évaluer la précision de ce système pour la mesure de vagues par comparaison avec des sondes ponctuelles asservies.

La faisabilité de cette technique de mesure pour la caractérisation de sillages de carènes a été testée dans le bassin de traction de Centrale Nantes. Le dispositif de mesure a été embarqué : le dispositif d'éclairage et les caméras sont montés sur un attelage tracté par le chariot. Une maquette de chalutier est attachée à cette structure de manière à ce que la poupe se situe sous l'écran. Pour créer des ondes courtes à la surface libre, un système

d'arrosage automatique avec buses est installé sur l'attelage. Trois sondes à houle résistives sont installées sur le bord du bassin pour pouvoir comparer les deux méthodes de mesure.

Dans un premier temps nous détaillons la méthode de mesure, puis nous présentons son implémentation dans le canal de traction. Après avoir expliqué le protocole expérimental, les résultats de l'analyse sont présentés et discutés.

## Summary

Free-surface elevation measurement is a key issue for advancing experimental campaigns in hydrodynamic test tank facilities. Currently, these measurements are primarily carried out using punctual gauges. When field measurements are required, this method quickly becomes tedious and costly due to the deployment of numerous wave gauges. Here, we present a new stereo-video-based free-surface reconstruction method. Unlike pre-existing stereo-video measurement techniques, the proposed method does not require particle seeding or other invasive means to create the texture required to enable correlation between the images from the two cameras. This method relies on the generation of short waves on the free surface, and the use of a uniform lighting setup. The short waves create a sufficiently fine texture allowing a diffuse reflection of the light, thus enhancing pixel correlation and stereo-video reconstruction. Initial tests have been conducted, in a wave flume, to evaluate the accuracy of this system for wave measurement by comparison with wave gauges.

The feasibility of this measurement technique to characterize hull wakes has been tested in the towing tank of Centrale Nantes. The measurement system was mounted on board : the lighting setup and cameras were installed on a rig towed by the traction trolley. A trawler model was attached to this structure so that its stern was located under the screen. To generate short waves on the free surface, an automatic sprinkler system with nozzles was installed on the rig. Three resistive wave gauges were placed at the edge of the tank to compare the two measurement methods.

First, we detail the measurement method, then its implementation in the towing tank. After explaining the experimental protocol, the results of the analysis are presented and discussed.

## I – Introduction

L'étude expérimentale des interactions fluide-structure en bassin d'essai est, aujourd'hui encore, complexe dû aux méthodes de mesures d'élévation de surface libre utilisées. Pour approfondir les connaissances dans ce domaine, il est nécessaire de pouvoir réaliser des caractérisations spatiales du profil de surface libre. En utilisant un moyen de mesure traditionnel comme la sonde à houle ponctuelle, la mesure de champs de vagues peut devenir très fastidieuse et chronophage. Par exemple, Swan et Sheikh [14] ont mené des expériences en utilisant un réseau de sondes à vague afin de reconstruire l'élévation de la surface libre autour d'un cylindre vertical interagissant avec les vagues. Pour mesurer l'élévation de la surface libre à plus de 1400 emplacements autour du cylindre, les auteurs ont dû répéter les expériences 250 fois dans les mêmes conditions de vagues, en déplaçant le réseau de sondes avant chaque répétition. Ce travail laborieux témoigne de l'intérêt de développer des solutions alternatives pour la caractérisation spatiale d'élévation de surface libre. Récemment, Gomit et al. [9] ont réalisé une revue exhaustive des approches de mesure d'élévation de surface libre optiques et notamment basées sur la stéréo-vidéo. Parmi elles, on retrouve des méthodes basées sur l'ensemencement de particules comme lors des expériences de Caplier et al. [6] ou de Ferreira et al. [7], ou bien des méthodes PLIF-stéréo utilisant la projection laser comme les expériences de van Meerkerk [15] par exemple. Gomit avait d'ailleurs aussi travaillé sur la caractérisation de sillage de carène en canal de traction par l'utilisation d'un système de mesure stéréo-vidéo associé à des projections de rayons lasers sur la surface libre [8]. Beaucoup de ces méthodes s'appuient donc en partie sur des solutions soit coûteuses, dangereuses, invasives ou polluantes.

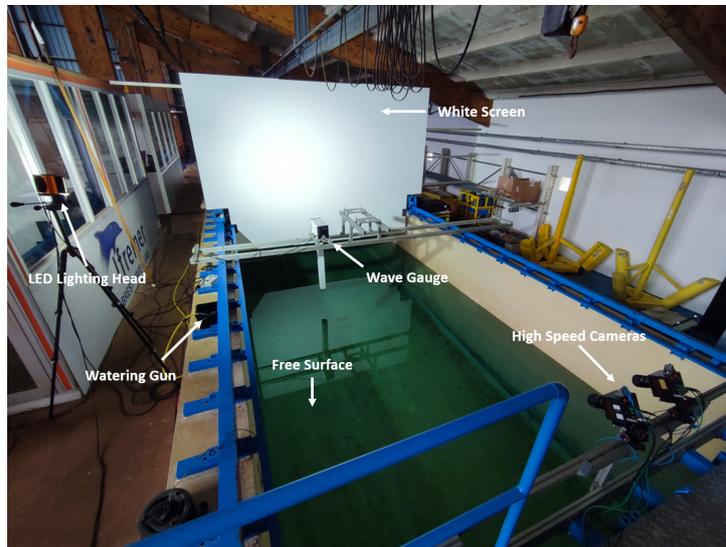


FIGURE 1 – Dispositif expérimental lors de l'évaluation de la précision du système de mesure stéréo-vidéo à l'Ifremer, Plouzané. (extrait de [11])

Dans ce contexte, et basé sur des travaux préliminaires réalisés par Adam [2], le projet Carnot MERS - STEREO-VIDEO a été créé dans le but de développer un système de mesures haute résolution de champs de vagues en bassin d'essais. Un point d'honneur a été mis sur la recherche d'une solution non-invasive pour créer la texture à la surface libre nécessaire à la reconstruction par stéréo-vidéo. L'une des solutions envisagées était l'utilisation d'ondes courtes à la surface libre pour créer la texture désirée. Au début du

développement, plusieurs moyens de générer des ondes courtes (air comprimé, transducteurs sous-marins [12]) ont été testés afin de prouver la faisabilité de cette méthode. La solution finalement retenue fût l'utilisation d'une pluie fine dont les impacts de gouttes à la surface libre créent les ondes courtes recherchées. Ces ondes courtes, associées à un éclairage adapté ont permis de montrer la possibilité de reconstruire la surface libre à l'aide d'une approche stéréo-vidéo. Une campagne expérimentale a été réalisée dans le canal à vagues de l'Ifremer à Plouzané dans le but d'évaluer la précision de mesure de ce nouveau système pour la mesure de vagues. La figure 1 présente le dispositif expérimental installé dans le canal. Lors de cette campagne, la pluie fine générant les ondes courtes est distribuée manuellement par l'intermédiaire d'un pistolet d'arrosage (non visible sur la figure 1). L'éclairage de la surface libre est réalisé par l'intermédiaire d'un large écran blanc éclairé par des spots LED.

L'évaluation de la précision de mesure du système stéréo-vidéo a été faite par comparaison avec des mesures réalisées avec une sonde à houle asservie en deux points de mesure. Ces essais ont été réalisés avec différents cas de vagues régulières. La figure 2 présente une comparaison entre deux mesures d'élévation de surface libre réalisées au même point par la sonde et à partir de reconstructions stéréo-vidéo pendant 4 s. Les deux courbes sont quasi superposées, ce qui témoigne de la précision du système de mesure développé. Cette campagne nous a permis de conclure que l'ordre de grandeur de l'erreur de mesure du système est millimétrique, et donc comparable à celle des sondes à houle. Une description plus précise de la campagne et une analyse approfondie des résultats sont présentées dans [11].

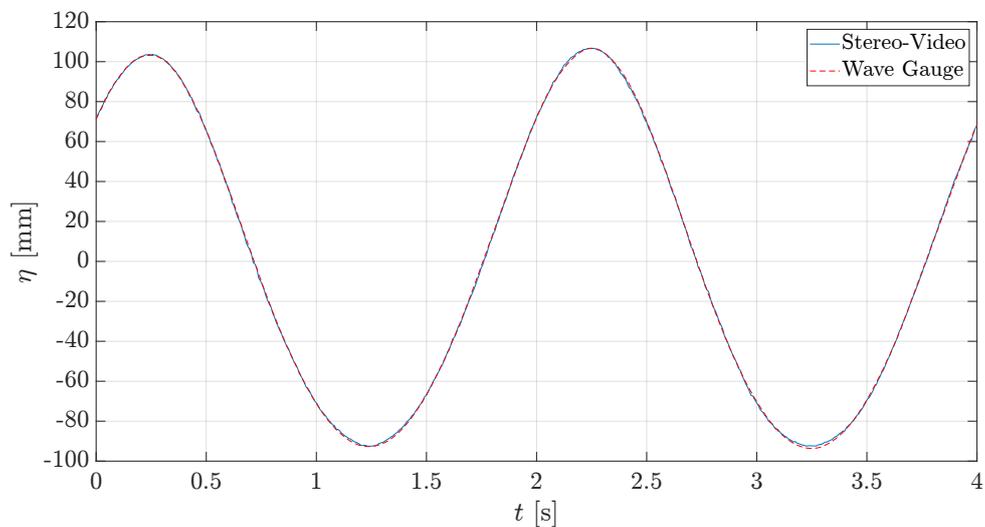


FIGURE 2 – Comparaison mesures sonde à houle et stéréo-vidéo pour vagues régulières  $H = 0.1$  m,  $T = 1$  s (extrait de [11])

Ce dispositif a ensuite été adapté afin d'essayer de reconstruire la forme d'un sillage de carène en bassin de traction. A la différence des essais précédents, le dispositif de mesure devait être embarqué de manière à pouvoir effectuer une mesure continue de l'élévation de surface libre à l'arrière d'une maquette de chalutier. Lors des essais au bassin de traction de Centrale Nantes, nous avons pu comparer des mesures stéréo-vidéo de profils de sillage avec les mesures de trois sondes résistives fixées sur le côté du canal.

Les principes de la méthode de reconstruction sont présentés dans la section II. L'ensemble de l'étude, à savoir le dispositif expérimental, le protocole expérimental et les

mesures, sont présentés dans la section III. Un bilan des essais est enfin dressé dans la section IV.

## II – Présentation de la méthode de reconstruction

La méthode de mesure est que nous proposons est basée sur une reproduction des conditions qui permettent la reconstruction de surface libre en pleine mer (voir [4, 3]). En extérieur, la lumière naturelle est réfléchiée de manière "pseudo" diffuse par la surface libre, celle-ci étant perturbée par des ondes courtes générées par le vent et/ou les courants. Afin de rendre cette technique utilisable en bassin d'essai, nous avons cherché à reproduire ce phénomène par l'utilisation d'un ciel artificiel qui permet l'éclairage homogène de la surface libre et par la génération d'ondes courtes (dont la longueur d'onde est un à deux ordres de grandeurs inférieurs à celle des vagues à mesurer) à la surface libre comme illustré sur la figure 3. En plaçant une caméra à l'opposé du ciel artificiel, la différence d'intensité des réflexions de la lumière sur les crêtes et creux des ondes courtes va mener à la création d'une image contrastée de la surface libre. Si la deuxième caméra est suffisamment proche, les zones sombres et claires proviendront des mêmes crêtes et creux sur les deux images, permettant ainsi la corrélation.

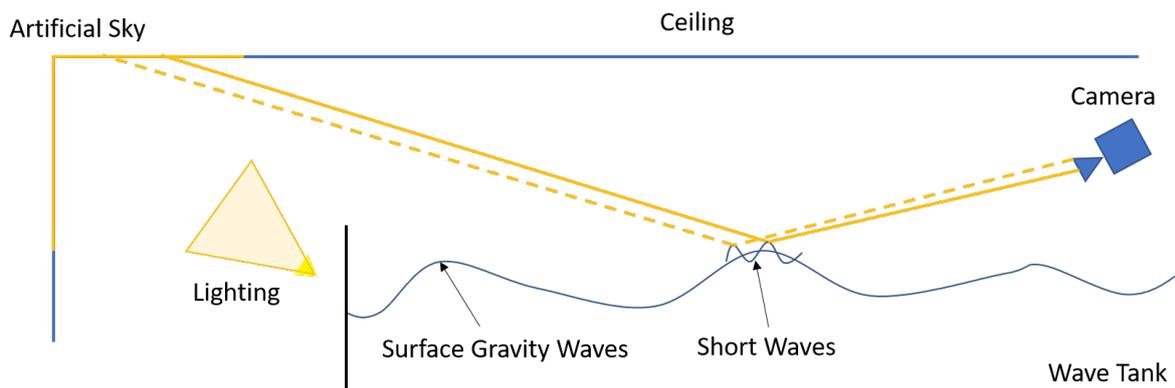


FIGURE 3 – Principes des conditions d'éclairage et de texture nécessaires à la mesure d'élévation de surface libre en bassin d'essais (extrait de [11])

## III – Reconstruction de sillage en canal de traction

L'objectif de cette campagne d'essais était d'étudier la faisabilité de la reconstruction du sillage d'une carène lors d'essais de traction réalisés en canal. Pour cela, le système de mesure par stéréo-vidéo utilisé pour les essais dans le canal à houle de l'Ifremer a été adapté pour être embarqué derrière un chariot de traction. L'objectif final de cette étude de faisabilité était de comparer les mesures de sillage faites par le biais de la reconstruction stéréo-vidéo avec des mesures obtenues par des sondes résistives placées au bord du canal.

### III – 1 Description du dispositif expérimentale

Les essais ont eu lieu dans le canal de traction de Centrale Nantes [1]. Ce canal mesure 140 m de long, pour une largeur de 5 m et une profondeur de 3 m. Un batteur à houle est présent à l'une des extrémités du canal mais n'a pas été utilisé lors de ces essais. Le

chariot de traction peut opérer à des vitesses allant jusqu'à 8 m/s. Dans le cadre de cette étude, des mesures avec des vitesses allant de 1,2 m/s à 1,8 m/s ont été effectuées. Pour des vitesses inférieures, le sillage était trop petit pour être mesuré, tandis qu'à des vitesses supérieures la turbulence générée par le déferlement du sillage rendait la reconstruction stéréo-vidéo difficile avec ce dispositif.

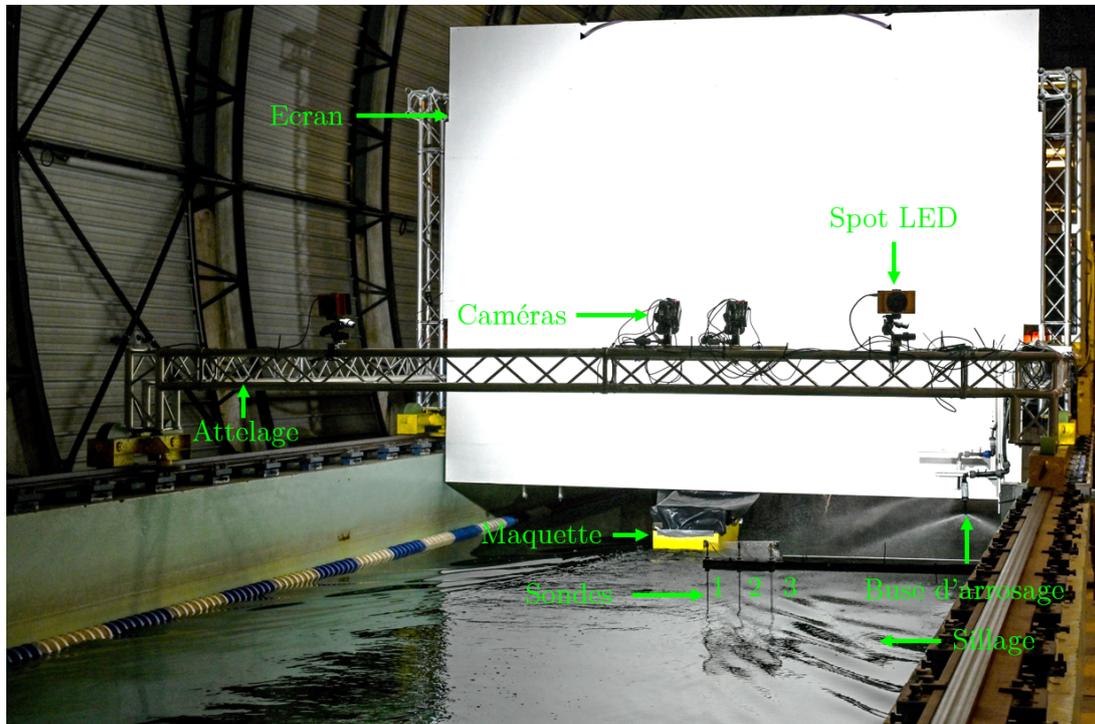


FIGURE 4 – Photo du dispositif expérimental dans le canal de traction de l'ECN

La figure 4 présente le dispositif mis en place pour cette campagne lors d'un essai de traction. On peut y voir le système de mesure embarqué : l'écran, le dispositif d'éclairage et les deux caméras rapides (PHOTRON FASTCAM MINI AX200) sont montés sur une structure roulante de 5x5 m, appelée "attelage", tractée par le chariot (non visible sur l'image). Le schéma en figure 5 présente une vue de dessus du dispositif expérimental. L'écran, constitué de planches en contreplaqués peintes en blanc mat, mesure 3,5 m de hauteur et occupe toute la largeur du canal. De manière à passer au-dessus des sondes, l'espace entre le bas de l'écran et la surface libre mesure 40 cm. Les caméras, équipées d'objectifs d'une focale de 35 mm, sont placées à environ 5 m de l'écran et à 1,7 m de la surface libre. L'angle d'incidence entre l'axe optique des caméras et la surface libre est de 34°. La baseline est de 39,3 cm, ce qui correspond à un peu plus que 10% de la distance entre la caméra et la zone mesurée (ici le point mesuré le plus éloigné des caméras est à environ 3 m) comme recommandé dans [4].

Une maquette de chalutier de 1,2m de longueur est fixée à l'attelage de manière à ce que la poupe se situe sous l'écran. Contrairement à des essais de tractions classique, la maquette n'est pas libre en tangage ou pilonnement. Afin d'avoir un meilleur contrôle sur la projection de la pluie par rapport aux essais réalisés précédemment, un système d'arrosage automatique avec buses est installé sur la structure tractée. Le réglage des buses a été réalisé de manière à ce que les ondes courtes apparaissent sur la majorité de la surface libre perçue par les caméras. Trois sondes à houles résistives sont installées sur le bord du bassin pour pouvoir comparer les deux méthodes de mesure. Les sondes sont

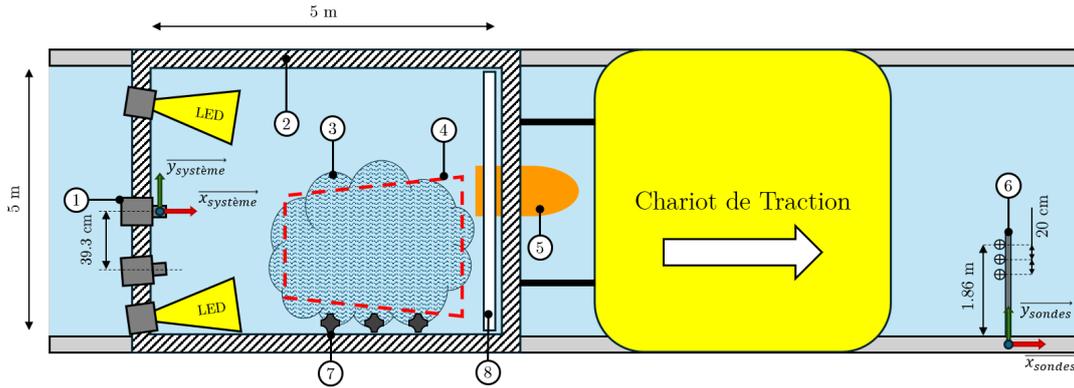


FIGURE 5 – Schéma d’installation dans le canal de traction de l’ECN. 1. *Caméras*, 2. *Attelage*, 3. *Surface libre texturée par ondes courtes*, 4. *Zone reconstruite*, 5. *Maquette*, 6. *Sondes*, 7. *Buses d’arrosage*, 8. *Ecran*

alignées, perpendiculairement à l’axe du bassin et espacées chacune de 20 cm. La sonde n°1, la plus éloignée du bord, est placée à 1,86 m du bord et la sonde 3 est la sonde la plus proche du bord (1,46 m)

L’enregistrement des caméras ainsi que du signal des sondes est synchronisé et est déclenché par un signal émis par le chariot de traction à son démarrage. La fréquence d’images des caméras est de 125 Hz, tandis que la fréquence de mesure des sondes à houle est de 200 Hz.

Les calibrations intrinsèques et extrinsèques des caméras sont réalisés grâce à un damier de 405 mm x 360 mm en utilisant la fonction MATLAB© : Stereo Camera Calibrator. Cette méthode est basée sur les approches de Bouguet [5], Zhang [16] et de Heikkila et Silven [10]. Les résultats de la calibration montrent que les caméras ont une faible distorsion et que l’erreur de reprojection moyenne est très basse (0,05 px).

De manière à avoir plus de flexibilité et de contrôle sur les mesures, les reconstructions se font uniquement par l’intermédiaire de fonctions MATLAB [13].

### III – 2 Protocole Expérimental

Le but de cette étude est de comparer les mesures de sillages réalisées par stéréovidéo avec des mesures réalisées par sondes résistives. Les mesures effectuées par stéréovidéo sont effectuées dans le repère mobile (à vitesse constante) de l’attelage, nommé ici « repère système », le sillage est donc considéré comme stationnaire. L’origine du « repère système » est située au niveau de la surface libre ( $z = 0$ ) et les coordonnées ( $x = 0, y = 0$ ) correspondent aux coordonnées ( $x, y$ ) du centre optique de la caméra de gauche dans le repère système. L’axe  $\vec{x}$  du repère est orienté selon la direction de déplacement du chariot. Les mesures effectuées par les sondes sont à des positions fixes dans un repère fixe du bassin (repère « sondes »).

Les reconstructions « brutes » (nuages de points) sont transportées dans le repère système, puis interpolées linéairement sur un maillage régulier ( $\Delta x = \Delta y = 5$  mm). Pour réduire le bruit de mesure, un filtre médian en  $z$  est appliqué sur une fenêtre de 30 par 30 mm. La fenêtre d’interpolation est réduite de manière à contenir seulement la zone mesurée par les sondes à vagues, à savoir  $1,6 \text{ m} < x < 3 \text{ m}$  et  $-0,6 \text{ m} < y < 0,1 \text{ m}$ . La figure 6 illustre les différentes étapes de reconstructions.

Fixées au bord du canal, les trois sondes résistives permettent une mesure temporelle

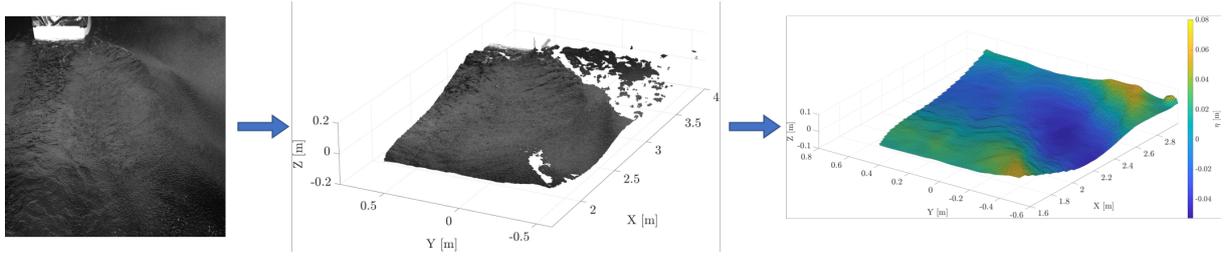


FIGURE 6 – Etapes de reconstruction ( $V = 1,6$  m/s). De gauche à droite : image caméra gauche ; reconstruction « brute » transportée dans le repère système ; élévation de la surface libre interpolée sur l'ensemble de la zone mesurée

et ponctuelle de l'élévation de surface libre  $\eta(t)$ . Connaissant la vitesse de déplacement du dispositif, la mesure temporelle d'élévation de surface libre peut être transformée en une mesure spatiale 2-D selon la direction  $\vec{x}$  de déplacement du chariot,  $\eta(x_t)$ . Pour transposer les mesures obtenues par les sondes dans le repère utilisé pour la stéréo-vidéo, il est nécessaire de connaître la coordonnée  $x_0$  des sondes, dans le repère système, à un instant  $t_0$ . Pour ce faire, les coordonnées de la pointe de la sonde n°1 sont triangulées à partir de la paire d'images correspondant à l'instant  $t_0$ . A partir de ces données, la mesure de l'élévation de surface libre peut être exprimée en fonction de  $x_t$  comme suit, avec  $V$  la vitesse d'avance du chariot :

$$x_t = x_0 - (t - t_0) \cdot V + k_V \cdot V \quad (1)$$

Note : Lors de l'analyse des essais, un décalage en  $x$  entre les mesures stéréo-vidéo et les mesures sondes transformées a été constaté. Ce décalage, dû au mode de transmission du trigger des sondes, est à peu près proportionnel à la vitesse d'avance du chariot. Dans l'éq.1, la valeur de  $k_V \cdot V$  correspond à la correction appliquée pour réduire ce décalage, avec  $k_V = 0,28$ . Ce coefficient ayant été déterminé de manière empirique, une deuxième passe est réalisée afin de déterminer plus précisément le décalage restant en minimisant la corrélation entre les deux signaux.

Au passage des sondes, le champ de vision des caméras est masqué par ces dernières, il est donc impossible de reconstruire la surface libre. Par conséquent, et de par la nature stationnaire du sillage observé, les comparaisons de mesures faites avec les sondes se font avec des mesures stéréo-vidéos réalisées avant et après le passage des sondes. Il est donc nécessaire d'analyser la répétabilité de nos essais et des mesures réalisées par les sondes à houles.

### III – 3 Evaluation de la répétabilité des essais

L'évaluation de la répétabilité des essais, et par conséquent des sondes, a été réalisée de la manière suivante : les mesures à chaque vitesse ont été répétées trois fois, puis les mesures de chaque sonde sont exprimées dans l'espace en fonction de  $x_t$  par l'équation (1), de manière à n'analyser que la partie du signal comparable avec la mesure stéréo-vidéo. Pour chaque sonde et chaque condition de vitesse, les mesures sont comparées une à une par la racine de l'erreur quadratique moyenne (ou RMSE, en anglais). Le tableau 1 présente les résultats sous forme de moyennes. Pour chaque condition,  $RMSE_n$  correspond à la moyenne des RMSE calculées entre chaque essai sur une même sonde

«  $n$  » ( $n$ , correspondant au numéro de sonde). L'erreur relative moyenne  $\varepsilon_n$  est calculée par rapport à l'élévation de surface libre maximum moyen  $\eta_{max}$  observée par la sonde entre chaque essai :  $\varepsilon_n = \frac{RMSE_n}{\eta_{max}}$ .

TABLE 1 – Evaluation de la répétabilité des essais et des sondes de mesure

$V$ [m/s]	$RMSE_1$ [mm]	$RMSE_2$ [mm]	$RMSE_3$ [mm]	$\varepsilon_1$ [%]	$\varepsilon_2$ [%]	$\varepsilon_3$ [%]
1.2	2.1	1.4	0.9	24	13.5	17.8
1.4	2.2	2.2	1.6	8.2	11.8	7
1.6	2.9	3.3	3.3	10.5	6.9	6.5
1.8	5.8	5.9	3.7	9.3	11.2	8.9

Pour les vitesses de 1,4, 1,6 et 1,8 m/s, l'erreur relative moyenne se situe entre 6,5% et 11,8%. Elle atteint même 24 % à 1,2 m/s, ce qui témoigne d'une répétabilité relative des essais. Les résultats présentés dans le tableau 1 démontrent donc que les sillages mesurés diffèrent légèrement d'un essai à l'autre et donc que le phénomène observé n'est pas totalement stationnaire. Cet élément est à prendre en considération lors des comparaisons entre les mesures par sondes et les mesures par stéréo-vidéo réalisées à des instants différents.

### III – 4 Comparaisons entre les mesures

Comme expliqué dans la section III – 2, lorsque le système passe au-dessus des sondes, ces dernières bloquent le champs de vision des caméras, rendant ainsi impossible la reconstruction de la surface libre au niveau des sondes. Les comparaisons entre les mesures sondes et mesures stéréo-vidéos sont donc faites avec des mesures stéréo-vidéos réalisées avant et après le passage des sondes.

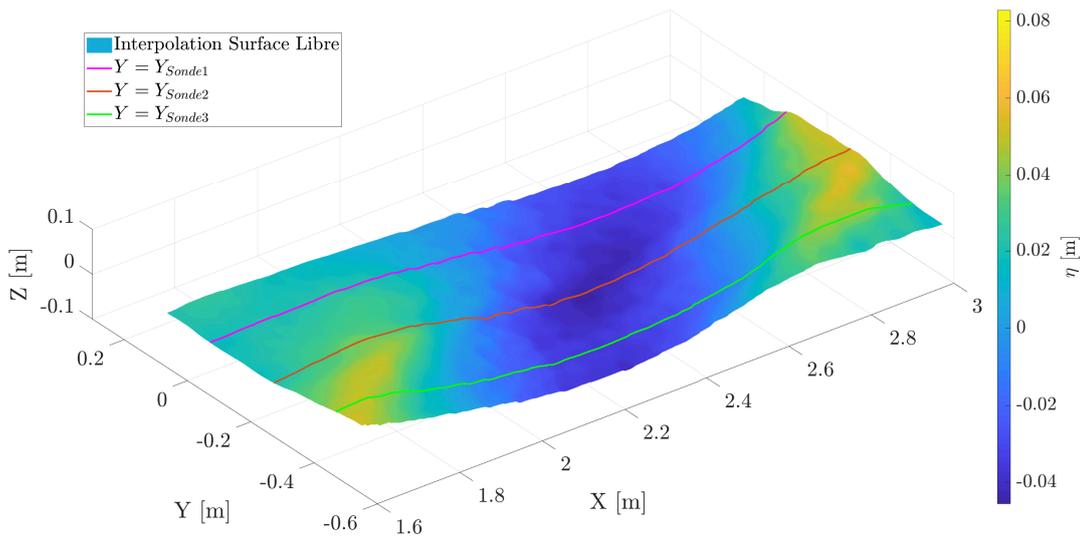


FIGURE 7 – Interpolation de la surface libre avec profils selon l'axe  $y$  des trois sondes

La figure 7 présente une interpolation faite à partir d'une reconstruction instantanée du sillage à  $V = 1,6$  m/s. Les trois courbes de couleurs représentent les profils de surface

libre selon l'axe Y des trois sondes installées au bord. Ce sont ces profils qui sont comparés aux mesures réalisées par les sondes.

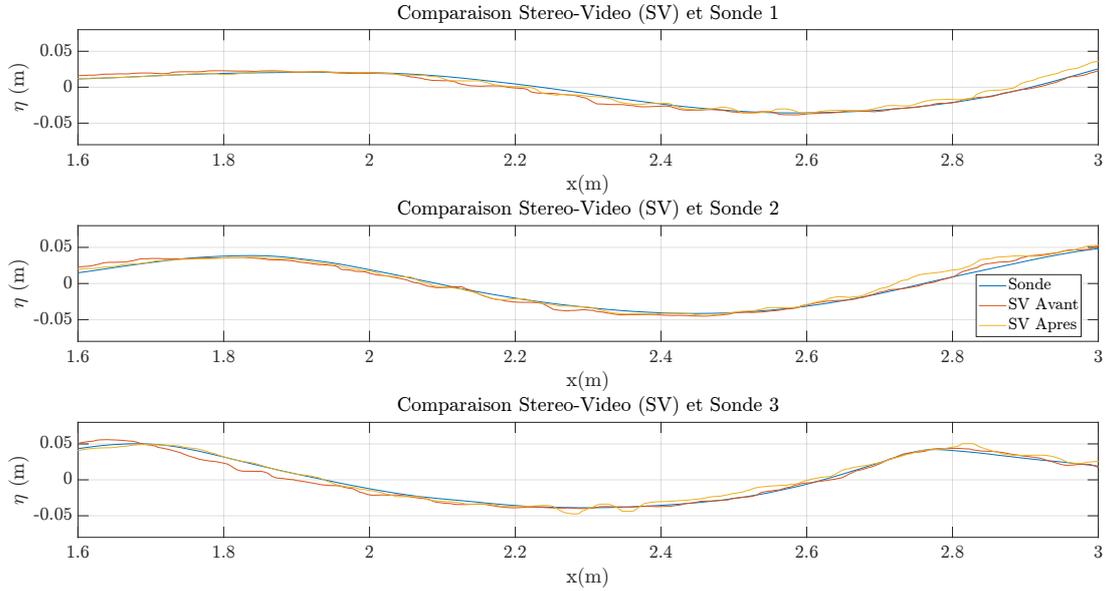


FIGURE 8 – Comparaison entre des mesures stéréo-vidéos instantanées (0,8 s avant et après passage des sondes) et sondes ( $V = 1,6$  m/s)

La figure 8 présente une comparaison entre la mesure du sillage réalisée par les sondes et par deux reconstructions stéréo-vidéo instantanées (0,8 s avant et après le passage des sondes) lors d'un essai à 1,6 m/s. On peut noter que les mesures stéréo-vidéos sont différentes, ce qui concorde bien avec la conclusion faite sur la répétabilité des essais, *i.e.* le sillage observé n'est pas totalement stationnaire.

De manière à lisser les mesures de sillages issus des reconstructions stéréo-vidéos, un échantillon de mesures de 3,2 s faites juste avant et après le passage des sondes est moyenné pour chaque essai. Pour comparer les mesures sondes et stéréo-vidéos, nous utilisons de nouveau la valeur du  $RMSE$ . Le  $RMSE$  est calculé entre la mesure par stéréo-vidéo et par sonde pour chaque essai, à chaque vitesse. Pour avoir un indicateur plus clair, un écart relatif  $\varepsilon$  est calculé par rapport à l'élévation de surface libre maximum observée par chacune des sondes :  $\varepsilon_n = \frac{RMSE_n}{\eta_{max_n}}$ .

La figure 9 présente une comparaison entre les mesures de la sonde 3 et de la mesure moyennée faite par la stéréo-vidéo pour le même essai que sur la figure 8. Les deux signaux sont très proches entre 1,6 m et 2,8 m, puis l'écart entre la mesure stéréo-vidéo et sonde grandit. Cet écart peut s'expliquer par le fait que la reconstruction est moins précise lorsque que l'angle relatif entre la surface libre et l'axe des caméras est très petit, comme déjà remarqué dans [11]. Ce phénomène est d'autant plus important lors des essais à 1,8 m/s car le sillage est plus cambré et la vague la plus éloignée des caméras déferle. Toutefois, la précision de la mesure obtenue par la sonde dans ces conditions est aussi discutable.

Le tableau 2 présente les  $RMSE$  et erreurs relatives moyennes sur chaque sonde pour les quatre conditions de vitesses étudiées. Pour chaque vitesse, les résultats de deux essais ont été moyennés.

Comme lors de l'étude menée dans le canal d'essais hydrodynamique d'Ifremer à Plouzané (voir [11]), l'écart de mesure entre les sondes et la stéréo-vidéo se situe entre 1,3

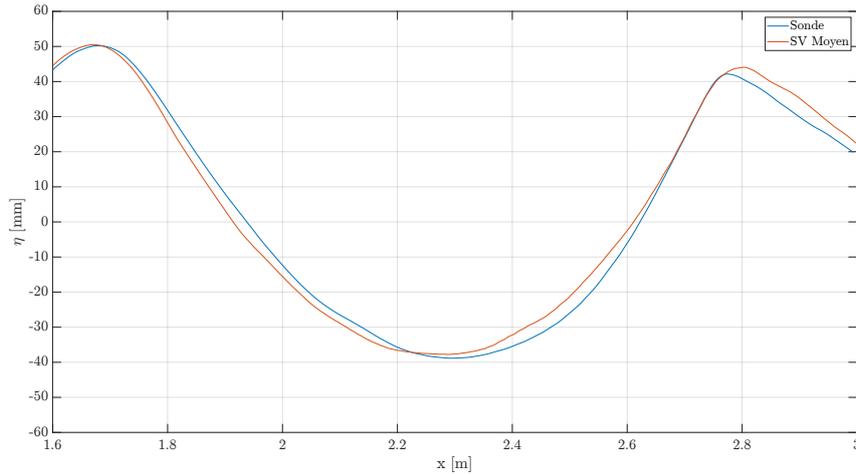


FIGURE 9 – Comparaison entre un échantillon de mesures Stéréo-Vidéo moyennée de 3,2s et mesures de la sonde 3 ( $V = 1,6$  m/s).  $RMSE = 3,2$  mm

TABLE 2 – Résultats du calculs des  $RMSE$  entre mesures stéréo-vidéo et sondes

$V$ [m/s]	$\eta_1$ [mm]	$\eta_2$ [mm]	$\eta_3$ [mm]	$RMSE_1$ [mm]	$RMSE_2$ [mm]	$RMSE_3$ [mm]	$\varepsilon_1$ [%]	$\varepsilon_2$ [%]	$\varepsilon_3$ [%]
1.2	8.9	11	5.5	2.1	2.3	2.6	23.6	20.6	47.3
1.4	25.8	18.7	23	1.4	2	1.3	5.2	10.7	5.6
1.6	26.6	47.7	50.9	2.4	3.3	2.3	8.9	6.8	4.5
1.8	67.3	50.8	41.6	3.3	6.6	6.4	4.8	12.9	15.4

mm et 3,3 mm, sauf pour les sondes 2 et 3 à 1,8 m/s. L'écart de mesure de sillage donc d'ordre millimétrique, ce qui correspond à l'ordre de grandeur de la précision des sondes résistives ainsi que de la répétabilité des essais de tractions réalisés. Au regard des erreurs relatives à 1,2 m/s, il est clair que le système de mesure stéréo-vidéo, comme les sondes résistives, atteint ses limites lorsque l'élévation de surface libre est inférieure à 5 mm. Les erreurs relatives élevées à 1,8 m/s, s'expliquent par le fait qu'une partie du sillage mesuré déferle au niveau des sondes 2 et 3, rendant une partie de la zone mesurée très turbulente, comme montrée sur la figure 10.

Cette analyse permet de démontrer que dans de bonnes conditions (élévation de surface libre suffisamment grande, pas de déferlement, angle relatif entre la surface libre et les caméras suffisamment grand) la précision de la reconstruction de sillage lors d'essais en canal de traction, est comparable à celle de sondes résistives. Ces essais de faisabilité ont donc démontré la possibilité de réaliser des mesures de sillage en canal de traction.

### III – 5 Limites et Améliorations

Lors du visionnage des vidéos utilisées pour la stéréo-vidéo, nous avons pu remarquer des vibrations au niveau de la maquette de chalutier. Pour les besoins de cette étude de faisabilité, la maquette devait être décalée vers l'arrière du chariot par rapport à une campagne d'essais en canal de traction classique. La fixation de la maquette sur l'attelage a donc été modifiée, entraînant quelques vibrations de par sa rigidité relative. Ces vibrations sont en grande partie responsable de la faible répétabilité constatée dans la section III – 3. Toutefois, l'objectif de cette campagne était de démontrer la faisabilité des mesures de sillage embarquées en canal de traction et non la précision de mesure du système stéréo-vidéo déjà évaluée dans [11]. Pour des campagnes d'essais plus sérieuses, nécessitant des mesures plus précises, la fixation de la maquette sera, bien entendu, réétudiée.

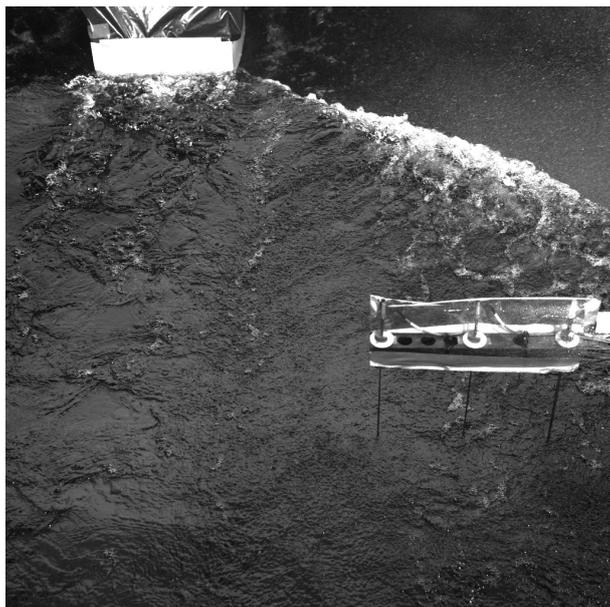


FIGURE 10 – Vue caméra de gauche à 1,8 m/s

A partir de 1,6 m/s, la vague la plus proche de la poupe de la maquette a commencé à déferler légèrement. A 1,8 m/s le déferlement s'intensifie et crée des turbulences à la surface libre (voir figure 10). Par nature, ces turbulences ne sont pas stationnaires, ce qui rend la comparaison entre les mesures stéréo-vidéo moyennées et sondes un peu aléatoire. Pour palier à ce problème, la comparaison des profils de surface libre au cours du temps aurait été plus adaptée. D'un point de vue pratique il aurait fallu soit fixer les sondes sur l'attelage ou bien installer les caméras au bord du canal, au niveau des sondes. Avec la première solution, la mesure des sondes résistives aurait sûrement été faussées par la traînée et le « run-up » au niveau des sondes lors de la traction de l'attelage. Placer les caméras sur le côté aurait permis une mesure et une comparaison avec les sondes plus précise. En revanche, la gestion de l'éclairage aurait été plus complexe et ce dispositif n'aurait pas permis de prouver la faisabilité d'une mesure embarquée rendant notamment possible l'observation de phénomènes transitoires.

#### IV – Conclusions et perspectives

Nous avons montré ici la faisabilité de la reconstruction de surface libre dans le sillage d'une maquette en canal de traction par stéréo-vidéo. Ces travaux s'inscrivaient dans la continuité des essais de reconstruction de surface libre par stéréo-vidéo réalisés en bassin d'essais pour le projet CARNOT-MERS STEREO-VIDEO. Nous avons démontré au cours d'essais présentés dans [11] que la stéréo-vidéo permettait de réaliser des mesures de profils de surface libre d'une précision comparable à celle de sondes à houles asservies. La technique se base sur l'utilisation d'un système d'éclairage diffus et d'un système de génération d'ondes courtes augmentant la rugosité de la surface libre.

Dans le cadre de cette campagne d'essais dans le canal de traction de Centrale Nantes, le système était embarqué sur un attelage tracté par le chariot de traction. Deux caméras étaient placées au-dessus de la surface libre dans la direction d'avance du chariot de traction. Pour obtenir un éclairage diffus, deux spots LED étaient montés sur l'attelage, de part et d'autre des caméras, orientés vers un écran blanc mat situé 5 m devant les

caméras. Un système d'arrosage automatique équipé de plusieurs buses permettait de diffuser uniformément une fine pluie générant les ondes courtes nécessaires à l'obtention d'une rugosité de surface libre. Le sillage à reconstruire est généré par la traction d'une maquette de chalutier attachée à l'attelage. La poupe de cette dernière se situe sous l'écran, de manière à avoir le plus de sillage visible dans le champs des caméras. Pour comparer les mesures issues des reconstructions, trois sondes à houle résistives ont été placées sur le bord du canal.

La comparaison des profils de surface libre dans l'axe des trois sondes a permis de conclure que l'écart de mesures entre les sondes au sens du *RMSE* est situé entre 1,4 et 3,3 mm lorsque la mesure est éloignée de la zone de déferlement du sillage. Lorsque l'intensité du déferlement augmente, l'écart atteint 6,6 mm. Il est toutefois important de noter que les comparaisons avec les sondes ont été réalisées à partir de mesures stéréovidéos moyennées sur plusieurs secondes. Le sillage n'étant pas totalement stationnaire tout au long des essais, en partie du fait des vibrations de la maquette lors des essais de traction, il est donc normal d'observer de tels écarts.

Bien que des améliorations peuvent être encore apportées au dispositif de mesure par stéréovidéo, cette campagne d'essais a permis de montrer la possibilité de réaliser des mesures de sillages embarquées. Cette faisabilité offre donc de nouvelles perspectives à la mesure de sillage lors de campagnes expérimentales en canal de traction, notamment sur l'observation de l'évolution des sillages au cours du temps et lors de phases transitoires.

## **Remerciements**

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude envers Anne Levesque, Sylvain Mazo et Matthieu Weber pour leur aide lors du montage et de la campagne expérimentale dans le canal de traction de Centrale Nantes.

## **Financements**

Ce travail/projet a été financé par l'Institut Carnot MERS - Marine Engineering Research for Sustainable, Safe and Smart Seas.

## **Références**

- [1] Bassin de traction. <https://lheea.ec-nantes.fr/moyens-dessais/bassins-de-genie-oceanique/bassin-de-traction>.
- [2] T. Adam. Mesures Stéréovidéos en bassin d'essais. Rapport de fin d'études, 2021.
- [3] A. Benetazzo. Measurements of short water waves using stereo matched image sequences. *Coastal Engineering*, 53(12) :1013–1032, Dec. 2006.
- [4] F. Bergamasco, A. Torsello, M. Sclavo, F. Barbariol, and A. Benetazzo. WASS : An open-source pipeline for 3D stereo reconstruction of ocean waves. *Computers & Geosciences*, 107 :28–36, Oct. 2017.
- [5] J.-Y. Bouguet. Camera Calibration Toolbox for Matlab. 2008.
- [6] C. Caplier, G. Rousseaux, D. Calluau, and L. David. Energy distribution in shallow water ship wakes from a spectral analysis of the wave field. *Physics of Fluids*, 28(10) :107104, Oct. 2016.

- [7] E. Ferreira, J. Chandler, R. Wackrow, and K. Shiono. Automated extraction of free surface topography using SfM-MVS photogrammetry. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54 :243–249, Apr. 2017.
- [8] G. Gomit, L. Chatellier, D. Callaud, L. David, D. Fréchou, R. Boucheron, O. Perelman, and C. Hubert. Large-scale free surface measurement for the analysis of ship waves in a towing tank. *Experiments in Fluids*, 56(10) :184, Sept. 2015.
- [9] G. Gomit, L. Chatellier, and L. David. Free-surface flow measurements by non-intrusive methods : a survey. *Experiments in Fluids*, 63(6) :94, May 2022.
- [10] J. Heikkila and O. Silven. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1106–1112, June 1997. ISSN : 1063-6919.
- [11] S. Le Page, A. Tassin, J. Caverne, and G. Ducrozet. A particle-free stereo-video free-surface reconstruction method for wave-tank experiments. *Experiments in Fluids*, 65(10) :157, Oct. 2024.
- [12] S. Le Page, A. Tassin, J. Caverne, Y. L. Gall, B. Gomez, and G. Ducrozet. Towards accurate stereo-video based free-surface reconstruction for wave tank experiments. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, 1288(1) :012009, Aug. 2023. Publisher : IOP Publishing.
- [13] MATLAB. Depth Estimation from Stereo Video - MATLAB & Simulink - MathWorks France.
- [14] C. Swan and R. Sheikh. The interaction between steep waves and a surface-piercing column. *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2033) :20140114, Jan. 2015. Publisher : Royal Society.
- [15] M. van Meerkerk, C. Poelma, and J. Westerweel. Scanning stereo-PLIF method for free surface measurements in large 3D domains. *Experiments in Fluids*, 61(1) :19, Jan. 2020.
- [16] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11) :1330–1334, Nov. 2000. Conference Name : IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.