



RAPPORT DE FIN D'ETUDES

Mesures Stéréo-vidéos en bassin d'essais

Auteur :
Tristan ADAM

Encadrants :
Alan TASSIN
Julien CAVERNE

*Ce rapport de fin d'étude est présenté pour l'obtention
du diplôme d'Ingénieur, spécialisé en systèmes embarqués
de l'ENSTA Bretagne,
en alternance avec l'Ifremer.*

17 août 2021

Mesures Stéréo-vidéos en bassin d'essais

Résumé

Ce rapport de fin d'étude présente la première mise en place d'une mesure de champs de vagues par stéréo-vidéo au bassin d'essai hydrodynamique de l'Ifremer, centre Bretagne. Le principe théorique de la mesure stéréo-vidéo ainsi que le fonctionnement de la chaîne de traitement open source : WASS qui effectue les reconstructions 3D des vagues y sont présentés. Une campagne expérimentale de 2 semaines a ensuite été réalisée afin de mesurer différents types de vagues avec des hauteurs entre 5 et 55 cm et des longueurs d'ondes entre 1 et 14 m. Les reconstructions sont replacées dans le repère du bassin et comparées à des mesures de référence afin de quantifier la qualité des reconstructions. Pour cette campagne, nous avons éclairé les particules présentes naturellement sur la surface de l'eau, cette technique fonctionne très bien mais malheureusement leur taille n'est pas maîtrisable et il se trouve que les particules deviennent trop petites avec certaines tailles d'objectif photo. Nous avons eu l'idée après campagne de générer une texture en surface en utilisant une source acoustique sous-marine.

Abstract

This final report presents the first implementation of a stereo-video wave field measurement in the hydrodynamic test basin of Ifremer, centre Bretagne. The theoretical principle of the stereo-video measurement as well as the functioning of the open source processing chain : WASS which carries out the 3D reconstructions of the waves are presented. A 2-week experimental campaign was then carried out to measure different types of waves with heights between 5 and 55 cm and wavelengths between 1 and 14 m. The reconstructions are placed in the basin reference frame and compared to reference measurements to quantify the quality of the reconstructions. For this campaign, we illuminated the particles naturally present on the surface of the water, this technique works very well but unfortunately their size is not controllable it happens that the particles become too small with certain size of photo lens. We had the idea after the campaign to generate a surface texture using an underwater acoustic source.

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mon maître d'apprentissage Alan Tassin pour m'avoir accompagné durant ces trois années au bassin d'essai de l'Ifremer. Je suis très reconnaissant du temps qu'il m'a accordé pour me guider et m'encadrer.

Je remercie aussi Julien Caverne qui s'est beaucoup investi dans mon apprentissage et plus particulièrement sur les parties techniques.

J'aimerais aussi remercier mes collègues Sebastien Chalony et Aurelien Tancray pour leurs conseils et leur aide durant cet apprentissage.

Je remercie aussi nos collègues acousticien Yves Le Gall et Eric Menut qui se sont libérés du temps pour réaliser les tests d'acoustique sous-marine avec nous.

Je remercie aussi mon tuteur école Sylvain Moyne et ma tutrice de projet de fin d'étude Hélène Thomas.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Résumé | i |
| Abstract | i |
| Remerciements | ii |
| 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Contexte | 1 |
| 1.2 Objectifs | 2 |
| 2 Principe de la mesure stéréo-vidéo | 3 |
| 2.1 Modélisation des caméras | 3 |
| 2.1.1 Paramètres intrinsèques à partir du modèle du sténopé | 4 |
| 2.1.2 Calibration stéréo, paramètres extrinsèques | 5 |
| 2.2 Rectification et géométrie épipolaire | 6 |
| 2.3 Matrice de disparités | 8 |
| 2.4 Triangulation | 9 |
| 2.5 Chaîne de traitement d'images : WASS | 10 |
| 2.5.1 Architecture logicielle | 10 |
| 2.5.2 Chaîne de traitement | 10 |
| wass_prepare | 10 |
| wass_stereo | 11 |
| 2.5.3 Paramètres d'influences « wass_stereo » | 11 |
| 3 Expérimentation | 13 |
| 3.1 Matériel utilisé | 13 |
| 3.2 Tests préliminaires sur hexapode | 16 |
| 3.2.1 Étalonnage | 17 |
| 3.2.2 Résultats | 18 |
| 3.3 Campagne de mesures | 19 |
| 3.3.1 Installation | 19 |
| 3.3.2 Étalonnage | 22 |
| 3.3.3 Essais hydrodynamiques | 24 |
| 4 Analyse et discussion | 26 |
| 4.1 Passage dans le repère du bassin | 26 |
| 4.1.1 Passage en coordonnées dimensionnel | 26 |
| 4.1.2 Passage dans le plan du bassin | 26 |
| 4.1.3 Alignement avec l'axe du bassin | 26 |
| 4.1.4 Déplacement de l'origine du repère | 28 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2 | Reconstruction avec les objectifs de 35mm | 29 |
| 4.2.1 | Taille de la zone de reconstruction | 29 |
| 4.2.2 | Reconstruction Statique | 30 |
| 4.2.3 | Reconstruction Dynamique | 35 |
| 4.3 | Reconstruction avec les objectifs de 20mm | 41 |
| 4.3.1 | Taille de la zone de reconstruction | 41 |
| 4.3.2 | Reconstruction Statique | 42 |
| 4.3.3 | Reconstruction Dynamique | 44 |
| 4.4 | Bilan | 45 |
| 5 | Génération de texture par acoustique sous-marine | 46 |
| 6 | Conclusion | 49 |
| A | Images d'étalonnage des tests préliminaires | 51 |
| B | Reconstruction du plan de l'hexapode suivant différentes inclinaisons du plateau | 52 |
| C | Sonde à houle asservie | 54 |
| | Bibliographie | 57 |

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Modélisation des trois différents référentiels | 3 |
| 2.2 | Rectification des images sur un plan commun. | 7 |
| 2.3 | Principe de la géométrie épipolaire | 8 |
| 2.4 | Principe de la triangulation. (A) : vue plane, (B) vue 3D. | 9 |
| 2.5 | Différentes étapes de la chaîne de traitement WASS | 12 |
| 3.1 | Sonde à houle asservie en fonctionnement | 15 |
| 3.2 | Image vue d'une caméra et mouchetis créé pour y ressembler | 16 |
| 3.3 | Tests préliminaires sur hexapode | 17 |
| 3.4 | Étalonnage pour les tests préliminaires sur hexapode | 17 |
| 3.5 | Reconstruction de l'hexapode à horizontale | 18 |
| 3.6 | Reconstruction de l'hexapode incliné de 5 et 10° | 19 |
| 3.7 | Montage de l'expérimentation | 20 |
| 3.8 | Installation du matériel autour de la zone de mesure | 20 |
| 3.9 | Schéma de l'installation pour les essais | 21 |
| 3.10 | Étalonnage des caméras pour la campagne de mesure | 22 |
| 3.11 | Reconstruction de la surface du bassin avec de mauvais paramètres d'étalonnages. | 23 |
| 3.12 | Reconstruction de la surface du bassin avec les paramètres intrinsèques non recalculés. | 24 |
| 3.13 | Taille de la zone de reconstruction théorique maximum, avec les tailles des pixels sur la surface mesurée | 24 |
| 4.1 | Comparaison entre un sinus généré à partir des coefficients estimés avec le solveur (en couleur) et les mesures d'une reconstruction (en noir) | 27 |
| 4.2 | Déplacement de l'origine du repère le long de l'axe \vec{X}_B | 29 |
| 4.3 | Résultats de WASS sur une paire d'images en 8 et 16 bits. | 30 |
| 4.4 | Reconstruction du bassin statique | 31 |
| 4.5 | Distribution des erreurs | 32 |
| 4.6 | Variation des écarts types suivant les axes X et Y | 32 |
| 4.7 | Distribution des erreurs suivant la taille des pixels | 33 |
| 4.8 | Densité Spectrale de Puissance obtenue en effectuant une FFT sur les 5 zones, moyennée par zone sur l'axe X et moyennée sur 100 reconstructions. | 34 |
| 4.9 | Reconstruction dynamique d'un train de vagues régulières de périodes 1s et d'amplitudes 6.2cm crête à creux | 35 |
| 4.10 | Comparaisons entre la mesure des sondes et la mesure stéréo (valeurs moyennées sur Y). | 38 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.11 | Comparaison entre la mesure des sondes et la mesure stéréo en des points particuliers sans filtrage. | 39 |
| 4.12 | Comparaison entre la mesure des sondes et la mesure stéréo en des points particuliers avec filetage médian 5x5 | 40 |
| 4.13 | Rapport d'amplitude entre les mesures stéréo en $X=0$ et $Y=[-400,-200,0,200,400]$ mm et la sonde à houle milieu. | 41 |
| 4.14 | Zone de reconstruction avec l'objectif de 20mm | 42 |
| 4.15 | Reconstruction statique du bassin | 43 |
| 4.16 | Distribution des erreurs sur une 100 ^{ème} de reconstruction avec l'objectif de 20mm | 43 |
| 4.17 | Evolution des écarts types suivant X et Y sur une 100 ^{aine} de reconstruction avec l'objectif de 20mm | 44 |
| 4.18 | Essai 51, H=320mm, T=3.2s, reconstruction sur l'intégralité de l'essai | 44 |
| 5.1 | Haut parleur sous-marin, placé 30cm sous la surface de l'eau . | 46 |
| 5.2 | FFT temporelle sur 1000 images, moyenné par indice de fréquence | 47 |
| 5.3 | Partie réel de l'image à différentes fréquences | 48 |
| A.1 | Images d'étalonnage des tests préliminaires de la caméra de gauche sur l'hexapode | 51 |
| B.1 | Reconstruction suivant différentes inclinaisons du plateau . . | 52 |
| C.1 | Sonde à houle asservie en fonctionnement | 54 |
| C.2 | Schéma cinématique de la sonde | 55 |
| C.3 | Schéma d'asservissement de la sonde | 55 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Tests préliminaires, Paramètres intrinsèques de la caméra de gauche | 17 |
| 3.2 | Tests préliminaires, Paramètres intrinsèques de la caméra de droite | 18 |
| 3.3 | Tests préliminaires, Paramètres extrinsèques | 18 |
| 3.4 | Paramètres intrinsèques de la caméra de gauche | 22 |
| 3.5 | Paramètres intrinsèques de la caméra de droite | 22 |
| 3.6 | Paramètres extrinsèques | 22 |
| 3.7 | Paramètres intrinsèques de la caméra de gauche, sans recalcul | 23 |
| 3.8 | Paramètres intrinsèques de la caméra de droite, sans recalcul | 23 |
| 3.9 | Paramètres extrinsèques, sans recalcul des paramètre intrinsèques | 23 |

1 Introduction

1.1 Contexte

Ce rapport présente les premiers essais et résultats de mise en place d'une chaîne de mesure haute résolution de champs de vagues au bassin d'essais hydrodynamique de l'Ifremer à Brest. Ce travail a été réalisé entre mars et septembre 2021 dans le cadre de mon projet de fin d'étude qui conclut mes trois ans d'apprentissage à l'Ifremer et de formation d'ingénieur à l'ENSTA Bretagne.

Le bassin d'essais de l'Ifremer du centre Bretagne permet de générer de la houle et du vent afin de reproduire des conditions de mer contrôlées. Cela permet de traiter les problèmes de comportement sur houle régulière et irrégulière, de corps flottants, ancrés ou en déplacement à faible vitesse. Le bassin fait 50m de long sur 12.5m de large et est profond de 10m sur les 37 premiers mètres puis plonge à 20m sur les derniers mètres. Il est doté d'un ensemble de moyens de mesure trajectométrie optique aérienne, sondes à houles, anémomètres, capteurs de force uni et multi directionnels, etc.

Une grande partie des essais hydrodynamiques en bassin incluent la génération de vagues et nécessitent une mesure précise de celles-ci. Les mesures de hauteur d'eau peuvent être dans différentes dimensions : en un certain point (1D), le long d'un vecteur (2D) et enfin sur un champ (3D). Les mesures les plus répandues et maîtrisées sont les mesures ponctuelles mais limitantes lorsqu'il faut connaître la hauteur d'eau en différents endroits car un capteur est nécessaire pour chaque point de mesure désiré. C'est dans ces cas que les mesures de champ deviennent intéressantes.

Les mesures tridimensionnelles de surface sont réalisées par imagerie. Elles permettent d'avoir une résolution spatiale excellente, relative à la taille d'un pixel projeté sur l'objet filmé, ainsi que des fréquences d'acquisitions bien au delà des besoins en essais hydrodynamique avec les caméras rapides actuelles. Il existe plusieurs méthodes de reconstruction de surface par imagerie.

Les mesures basées sur les propriétés optiques de la surface telle que la réfraction. Elles utilisent une unique caméra, les images sont comparées à une image de référence prise à un instant où l'eau est calme. Elles sont très précises mais difficiles à mettre en place et limitées à des ondes courtes (ZHANG et COX, 1994; MOISY, 2010).

Les mesures dites de stéréo-vision mettent en correspondance les images prises par plusieurs caméras. Pour cette technique, il est nécessaire de créer une texture sur la surface de l'eau afin que les images matérialisent cette surface. De nombreuses personnes se sont penchées sur le sujet et différentes solutions ont été explorées telles qu'ensemencer la surface à l'aide de particules flottantes de polypropylène (GOMIT et al., 2014) ou de perlite pour

réduire les problèmes d'agglomérations des particules (CAPLIER et al., 2016) et utiliser des algorithmes de Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) (TURNERY, ANDERER et BANERJEE, 2009; CHATELLIER et al., 2013). Il est aussi possible d'utiliser la projection de motifs sur une eau ayant subi une coloration (TSUBAKI et FUJITA, 2005; COBELLI et al., 2009), ou encore illuminer par laser une eau contenant un colorant fluorescent (GOMIT et al., 2015; MEERKERK, POELMA et WESTERWEEL, 2020).

Tous ces types de mesures nous posent différents problèmes au bassin de Brest de par ses dimensions et la diversité des expérimentations qui y sont réalisées. Les méthodes utilisant la réfraction ne sont ni adaptées aux profondeurs d'eau de 10m ni aux types de vagues générés (limitation en courbure). Ensemencer la surface n'est pas non plus envisageable à cause de la taille du bassin et du système de filtration d'eau. La coloration de l'eau n'est pas non plus possible car l'eau doit rester transparente pour les autres applications du bassin et les lasers posent des problèmes de sécurité et d'accès.

Pour toutes ces raisons, nous avons décidé d'utiliser une technique différente pour générer de la texture en surface, en illuminant les poussières présentes naturellement sur la surface de l'eau, à l'aide de puissants projecteurs à LEDs. Pour la reconstruction, nous avons utilisé la chaîne de traitement WASS développée par Filippo Bergamasco et Alvisé Benetazzo (BERGAMASCO et al., 2017). A l'origine créée pour reconstituer en 3D des vagues en mer, à partir d'un bateau ou d'une plateforme, nous avons appliqué cette chaîne de traitement en bassin.

1.2 Objectifs

Il est important de noter que ce travail constitue la première mise en œuvre d'un système stéréo-vidéo au bassin d'essai et qu'au départ l'équipe du bassin ne disposait pas d'expérience antérieure ni de compétences particulières sur ce sujet. Les objectifs principaux du projet de fin d'études sont d'évaluer la faisabilité de la mesure stéréo-vidéo pour la reconstruction de champs de vagues en bassin d'essais. Afin de répondre à cette question et d'évaluer expérimentalement la performance de cette technique en bassin, mon travail a suivi les étapes suivantes :

- Etude bibliographique sur les travaux existants.
- Compréhension du principe de la mesure par imagerie stéréo-vidéo.
- Prise en main de la chaîne logicielle WASS.
- Réalisation de tests préliminaires sur hexapode afin d'évaluer la précision et les limites de la technique en condition contrôlée.
- Réalisation de mesures de champs de vagues au bassin d'essais et comparaison avec les mesures de référence issues des sondes à houle.
- Analyse des points forts et faibles de la technique de mesure.

2 Principe de la mesure stéréo-vidéo

2.1 Modélisation des caméras

Les paramètres des caméras décrivent la transformation d'un point dans le système de coordonnées terrestres en un point sur l'image. Ces paramètres se décomposent en deux parties : les paramètres intrinsèques et les paramètres extrinsèques. La transformation intrinsèque traite la distorsion des lentilles et la projection du système de coordonnées d'une caméra sur l'image, cette transformation est propre à chacune des caméras, Figure 2.1.B à 2.1.C. La transformation extrinsèque décrit la relation entre le système de coordonnées terrestres et le système de coordonnées de chaque caméra, Figure 2.1.A à 2.1.B.

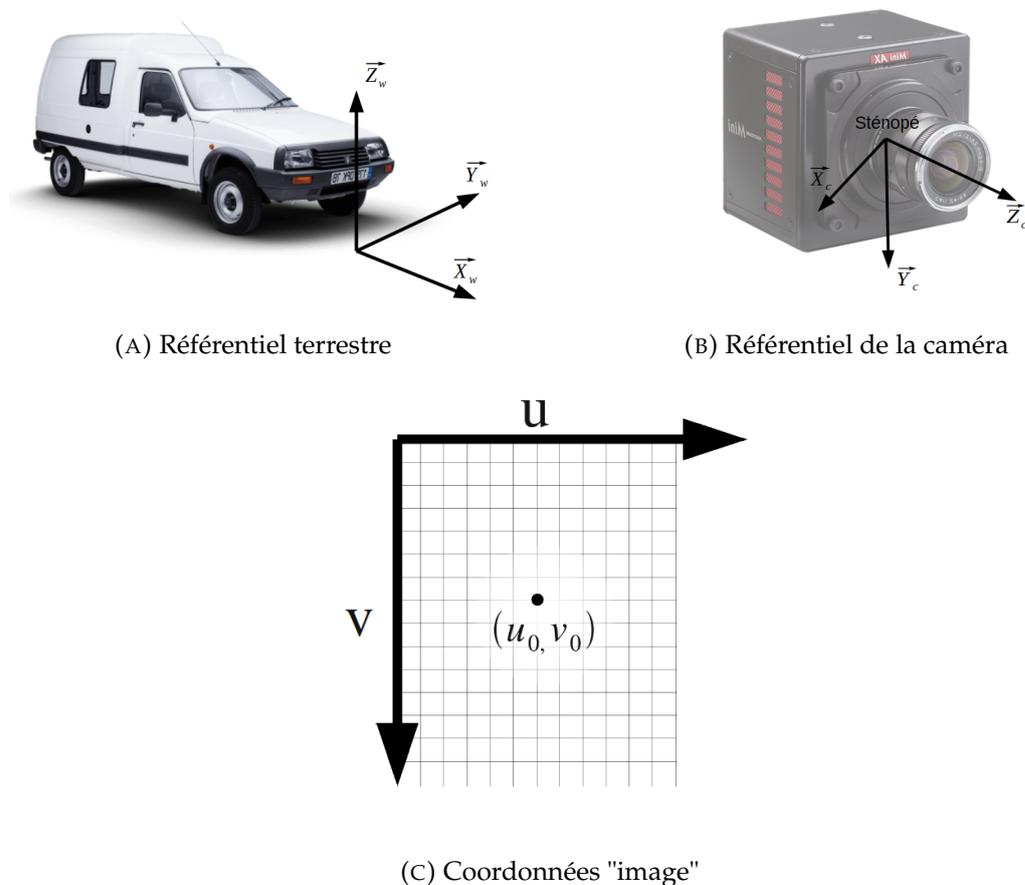


FIGURE 2.1 – Modélisation des trois différents référentiels

2.1.1 Paramètres intrinsèques à partir du modèle du sténopé

Dans un premier temps, à partir de (HEIKKILA et SILVEN, 1997) et en prenant les notations de (BOUGUET, 2015) pour les paramètres des caméras, la relation entre un point P de coordonnées $(X_w, Y_w, Z_w)^T$ dans le repère terrestre et ses coordonnées $(X_c, Y_c, Z_c)^T$ dans le repère des caméras est une transformation extrinsèque : une rotation R_α suivi d'une translation T_α qui peut être établie par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R_\alpha \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} + T_\alpha \quad (2.1)$$

En utilisant le modèle du sténopé, « pinhole model » en anglais et en laissant de côté la distorsion, la projection normalisée d'un point dans le repère d'une caméra $(X_c, Y_c, Z_c)^T$ sur le plan image $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)^T$ peut être exprimée comme ceci :

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

On obtient les coordonnées de l'image (u'_i, v'_i) par la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} u'_i \\ v'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fc(1)(\tilde{u}_i + \alpha_c \tilde{v}_i) \\ fc(2)\tilde{v}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} cc(1) \\ cc(2) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

- **fc(1), fc(2)** : Distance focale, exprimée en mm. Ils ne sont pas identique si le capteur optique n'est pas carré.
- α_c : L'inclinaison correspond à l'angle entre les rangées horizontales et verticales et est uniquement différente de 0 lorsque les pixels ne sont pas rectangulaires, ce qui n'est pas commun.
- **cc(1), cc(2)** : Correspondent aux coordonnées de la projection du centre optique de la caméra sur le plan image.

On retrouve souvent l'équation 2.3 sous cette forme afin de faire apparaître la matrice intrinsèque **K** :

$$\begin{bmatrix} u'_i \\ v'_i \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

où :

$$K = \begin{bmatrix} fc(1) & \alpha_c \cdot fc(1) & cc(1) \\ 0 & fc(2) & cc(2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

La relation 2.3 n'est cependant qu'une approximation car la distorsion n'a pas été prise en compte. La distorsion provient des lentilles de l'objectif, elle se décompose en deux parties : la distorsion radiale 2.5 qui correspond à l'asymétrie des lentilles et la distorsion tangentielle 2.6 au mauvais alignement des lentilles.

- **La distorsion radiale** peut être exprimée comme ceci :

$$\begin{bmatrix} \delta u_i^{(r)} \\ \delta v_i^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_i(kc(1)r_i^2 + kc(2)r_i^4 + kc(5)r_i^6 + \dots) \\ \tilde{v}_i(kc(1)r_i^2 + kc(2)r_i^4 + kc(5)r_i^6 + \dots) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Où $kc(1)$, $kc(2)$, $kc(5)$ sont les coefficients de distorsion radial et $r_i = \sqrt{\tilde{u}_i^2 + \tilde{v}_i^2}$.

- **La distorsion tangentielle** peut être exprimée comme ceci :

$$\begin{bmatrix} \delta u_i^{(t)} \\ \delta v_i^{(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2kc(3)\tilde{u}_i\tilde{v}_i + kc(4)(r^2 + 2\tilde{u}_i^2) \\ kc(3)(r^2 + 2\tilde{v}_i^2) + 2kc(4)\tilde{u}_i^2\tilde{v}_i^2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Où $kc(3)$, $kc(4)$ sont les coefficients de distorsion tangentielle.

En ajoutant la distorsion à l'équation 2.3, nous obtenons le modèle complet du sténopé :

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fc(1)(\tilde{u}_i + \alpha_c\tilde{v}_i + \delta u_i^{(r)} + \delta u_i^{(t)}) \\ fc(2)(\tilde{v}_i + \delta v_i^{(r)} + \delta v_i^{(t)}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} cc(1) \\ cc(2) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

On détermine ces paramètres avec la méthode de calibration intrinsèque de (BOUGUET, 2015), où un damier de calibration est positionné dans différents plans. Pour chacune des caméras et pour chacune des n positions du damier est aussi associée une transformation extrinsèque 2.1 et donc $2n$ vecteurs de translation et $2n$ vecteurs de rotations qui nous seront indispensables pour la calibration stéréo.

2.1.2 Calibration stéréo, paramètres extrinsèques

Comme expliqué par (HIRSCHMÜLLER, 2003) dans la partie 2.3 Modeling Cameras, le but de cette calibration est de retrouver la relation entre le repère de la caméra de gauche et celui de la caméra de droite à partir des couples de vecteurs de rotation et de translation obtenus durant la calibration intrinsèque. (On considère que la calibration de la caméra de gauche et de droite ont été faites au même moment). En reprenant l'équation 2.1 et en la séparant entre la caméra de gauche et de droite, un point dans les coordonnées terrestres $(X_w, Y_w, Z_w)^T$ peut être représenté comme ceci dans le système de coordonnées de la caméra de gauche $C_l = (X_{cl}, Y_{cl}, Z_{cl})^T$, et de la caméra de droite $C_r = (X_{cr}, Y_{cr}, Z_{cr})^T$:

$$C_l = R_l \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} + T_l, \quad (2.8a)$$

$$C_r = R_r \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} + T_r. \quad (2.8b)$$

En insérant la première proposition dans la seconde on obtient la relation entre les deux caméras :

$$\begin{aligned} C_r &= R_r R_l^{-1} (C_l - T_l) + T_r \\ &= R_r R_l^{-1} (C_l - T_l + R_r R_l^{-1} T_r) \\ &= R (C_l - T). \end{aligned} \quad (2.9)$$

La matrice $R = R_r R_l^{-1}$ et le vecteur $T = T_l + R_r R_l^{-1} T_r$ les paramètres extrinsèques qui représentent le passage du repère de la caméra de gauche à celui de droite. Ce calcul est possible pour chacune des n positions du damier prises dans l'espace, il y a donc n vecteurs R_i et T_i . Il est possible à ce moment de, soit simplement déterminer un vecteur R et T moyen à partir des R_i et T_i à disposition, soit de recalculer l'ensemble des paramètres intrinsèques et extrinsèques simultanément.

2.2 Rectification et géométrie épipolaire

Une fois le modèle du sténopé identifié pour chaque caméra, on peut passer à l'étape de stéréo-vidéo à proprement parler. Celle-ci consiste à rectifier les images, c'est à dire les projeter sur un plan commun (Figure : 2.2). Cette projection dépend à la fois des paramètres intrinsèques et extrinsèques et admet deux degrés de libertés : l'un est la distance entre les centres optiques des caméras et le plan commun de rectification, il est habituellement pris la distance focale, l'autre est l'angle entre l'axe optique des caméras et l'axe orthogonal du plan de rectification, il est souvent fixé à 0° .

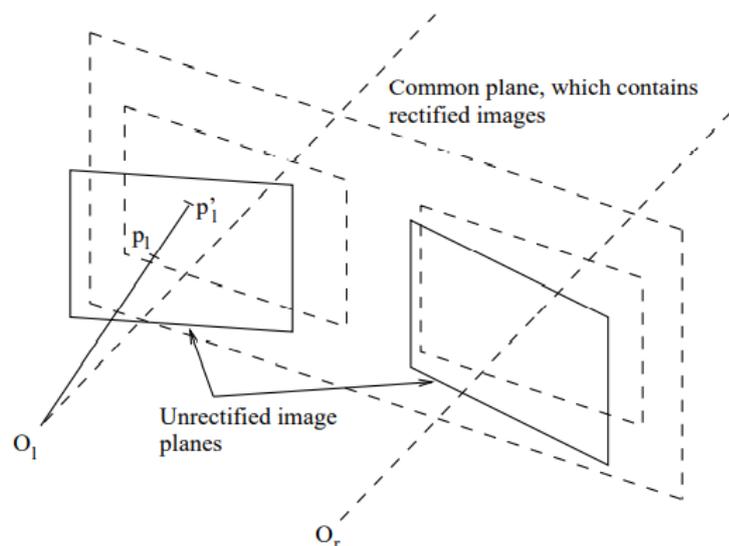


FIGURE 2.2 – Rectification des images sur un plan commun.

Source : HIRSCHMÜLLER, 2003

La géométrie épipolaire va nous permettre d'établir deux principes sur les images rectifiées. Comme on peut le voir sur la Figure 2.3, un rayon lumineux partant du point P et allant vers le centre optique de la caméra de gauche O_L apparaît comme un unique point P_L sur l'image de la caméra de gauche mais apparaît comme étant une ligne (e_R, P_R) , dite ligne épipolaire, sur l'autre image. Une fois que les images ont été projetées sur un plan commun, le premier principe est que les lignes épipolaires telles que (e_L, p_L) et (e_R, p_R) vont se superposer, cela induit qu'un point vu par les deux caméras va se retrouver sur les mêmes lignes de pixels sur les images rectifiées de droite et de gauche. Le second principe après rectification est que les lignes (P_L, O_L) et (P_R, O_R) vont être parallèles. Un point vu à l'infini par les caméras va donc apparaître sur la même colonne entre l'image rectifiée de droite et de gauche, tandis qu'un point plus proche va apparaître décalé en colonne entre les deux images rectifiées. Ce décalage appelé « disparité » va permettre de nous renseigner sur la profondeur de la scène observée.

HIRSCHMÜLLER, 2003 explique ceci plus en détail dans la partie « 2.4 Transformation into an Ideal Model » de sa thèse et LECKLER, 2013 dans la partie « 3.3 Theoretical background » de la sienne.

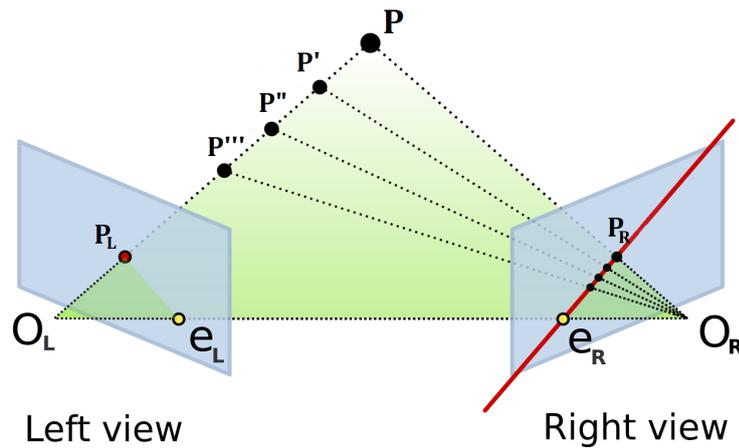


FIGURE 2.3 – Principe de la géométrie épipolaire

Source : Adapté de Wikipedia

2.3 Matrice de disparités

Comme expliqué précédemment, l'écart en colonne entre deux points identiques sur les images va nous informer sur la profondeur de l'image. Il va donc falloir identifier deux points identiques entre les images, pour cela on utilise des algorithmes de corrélation d'image qui vont mettre en relation une fenêtre de pixels d'une image et chercher la fenêtre la plus similaire partout dans l'autre image. L'avantage d'avoir rectifiés les images est que l'on sait qu'un point vu par les deux caméras va se retrouver sur la même ligne sur les images rectifiées de droite et gauche. Les algorithmes vont donc pouvoir travailler en faisant des correspondances de fenêtre sur la même ligne et non partout dans l'image, cela va permettre un gain de temps en calcul. La recherche de point correspondant va être effectuée pour chacun des pixels et les résultats de ces calculs sont enregistrés dans une image appelée « matrice de disparités ». L'algorithme de corrélation d'image utilisé par WASS est l'algorithme SGBM, développé par HIRSCHMULLER, 2008.

2.4 Triangulation

Une fois que la correspondance entre les pixels des deux images a été faite et que la matrice de disparité a été générée, on va pouvoir retrouver la position de leur point correspondant dans l'espace.

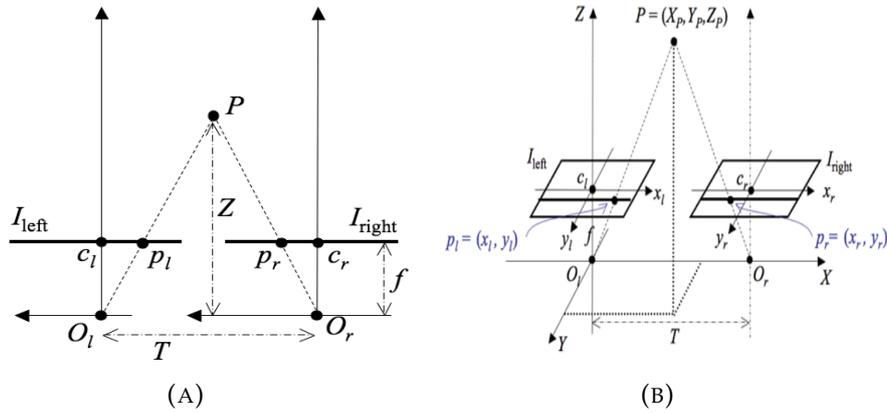


FIGURE 2.4 – Principe de la triangulation. (A) : vue plane, (B) vue 3D.

Source : Basics of Computational Stereo Vision : *Basics of Computational Stereo Vision* s. d.

Sur la figure : 2.4, I_{left} et I_{right} sont les plans des images rectifiées, O_l et O_r sont les centres optiques des caméras, c_l et c_r sont les centres des images, (x_l, y) et (x_r, y) les coordonnées des points p_r et p_l , f la distance focale et T la baseline. La position du point $P = (X_p, Y_p, Z_p)$ est dans le repère où les axes \vec{X} et \vec{Y} sont dans le plan de rectification avec \vec{X} parallèle à la baseline et \vec{Y} orthogonal à \vec{X} . \vec{Z} est orthogonal au plan de rectification. Le centre du repère est le centre optique de la caméra de gauche O_l .

On retrouve les coordonnées de P comme ceci :

$$x_l = \frac{X_p f}{Z_p}; \quad x_r = \frac{(X_p - T) f}{Z_p}; \quad y = \frac{Y_p f}{Z_p}, \quad (2.10)$$

$$X_p = x_l \frac{T}{d}; \quad Y_p = y_l \frac{T}{d}; \quad Z_p = f \frac{T}{d} \quad (2.11)$$

où $d = x_l - x_r$ est la disparité.

La méthode de triangulation de WASS, prend aussi en compte le fait que les rayons peuvent ne pas se croiser à cause d'un bruit sur les coordonnées des pixels. Cette méthode est présentée par HARTLEY et STURM, 1997.

2.5 Chaîne de traitement d'images : WASS

La chaîne de traitement a pour but de reconstituer en 3D des vagues océaniques, à partir de couples d'images pré-capturés par deux caméras.

2.5.1 Architecture logicielle

L'architecture de WASS a bien évolué depuis leur dernière publication (BERGAMASCO et al., 2017) en proposant une installation sur un conteneur Docker. Ceci permet une visualisation de l'application avec ses dépendances (bibliothèques et packages) en l'isolant du système d'exploitation. Bien que les conteneurs soient originellement fait pour fonctionner sur des machines linux, on peut à présent les utiliser sur des machines Windows en utilisant WSL 2 pour émuler un noyau Linux.

2.5.2 Chaîne de traitement

Les surfaces de reconstruction peuvent être extrêmement grande : 20 x 20 à 70 x 70 m (BERGAMASCO et al., 2017). Sur de tels surfaces la cible de calibration serait immense et extrêmement difficile voir dangereuse à manipuler pour obtenir les paramètres extrinsèques (BERGAMASCO et al., 2016). Dans ce sens, WASS propose une autocalibration des paramètres extrinsèques, ce qui permet de retrouver la matrice de rotation R et le vecteur de translation normalisé $t = T/||T||$. Il n'y a donc pas de notion d'échelle, la norme du vecteur de translation t est unitaire, ceci nous pose un problème car il faut estimer la distance entre les 2 foyers optiques des caméras, $||T||$, dite « baseline ». Que l'on utilise ou non l'autocalibration, WASS travaille avec ce vecteur normalisé t et il faudra dans tous les cas multiplier les coordonnées du nuage de points en sortie de WASS par la « baseline ». Cela ajoute une incertitude non négligeable si $||T||$ est estimé en mesurant la distance entre les caméras (on ne sait d'ailleurs pas précisément où sont leur foyer optique) plutôt qu'avec une calibration extrinsèque avec damier.

WASS laisse donc le choix à l'utilisateur d'utiliser l'autocalibration ou d'importer ses propres paramètres de calibration. N'étant pas intéressé par l'autocalibration car elle amène un biais supplémentaire, la méthode de Bouguet a été utilisée pour l'étalonnage. Seules les programmes « wass_prepare » et « wass_stereo » seront donc présentées ici.

wass_prepare

Cette première étape va créer un répertoire de travail pour chaque couple d'image, ainsi que dé-distordre les images à partir des paramètres de distorsions fournis par l'étalonnage.

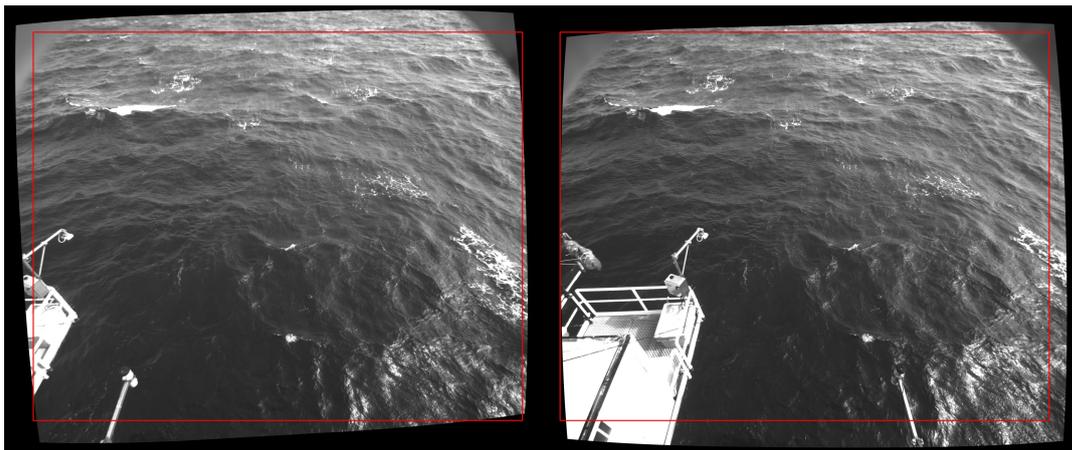
wass_stereo

Cette partie est la plus lourde, elle comporte un grand nombre d'étapes :

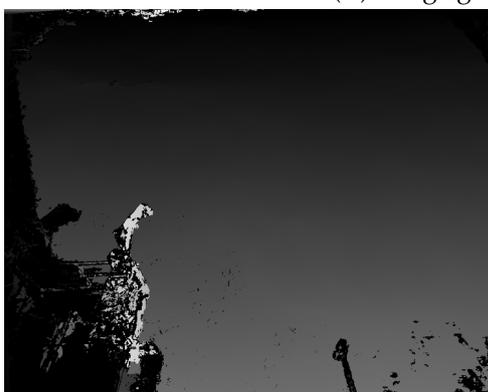
1. Rectification de la paire d'image à partir des paramètres de calibration intrinsèques et extrinsèques, et génération d'un fichier « stereo.jpg » permettant à l'utilisateur de vérifier la rectification, Figure 2.5a.
2. Génération de la matrice de disparités à partir de l'algorithme SGBM (HIRSCHMULLER, 2008), Figure 2.5b.
3. Fermeture (érosions puis dilations) de la matrice de disparité afin de combler les trous, Figure 2.5c.
4. Triangulation de la matrice de disparité pour obtenir un nuage de point.
5. Filtrage supprimant les points théoriquement trop proches et trop loin.
6. Filtrage de tous les points pour lesquels l'angle entre les deux rayons d'intersection est inférieur à 20 degrés, Figures 2.5d et 2.5e.
7. Filtrage selon l'axe Z_C des caméras. La surface de l'eau est considérée comme étant lisse et continue, WASS va estimer que les points de reconstruction sont reliés entre eux s'ils ont été triangulés à partir de pixels adjacents. Cela va générer une ou plusieurs composantes de reconstruction connectées. Les bords de ces composantes connectées vont être supprimés si la valeur absolue de leur coordonnée en Z_C est supérieur à 98% de la moyenne de celles de la composante connectée. On considère comme étant la composante principale celle qui recouvre le plus de surface. On conserve cette composante sur la reconstruction alors que toutes les autres sont supprimées. Elle est de couleur verte sur la Figure 2.5f.
8. Détermination du plan moyen de la mer. Cette étape est la plus lourde et non adaptée au bassin d'essai où les longueurs d'onde de la houle peuvent être supérieures à la taille de la zone reconstituée.

2.5.3 Paramètres d'influences « wass_stereo »

La page officiel de WASS n'est pas très détaillée sur les paramètres de reconstructions. Cependant, le programme « wass_stereo » qui est écrit en C++ et utilise la classe : `cv::StereoBinarySGBM` *Class Reference 2021*, d'OpenCV qui implémente l'algorithme SGBM de HIRSCHMULLER, 2008, les paramètres sont détaillés dans la description de la classe. Les paramètres par défaut de WASS permettant déjà de très bonne reconstruction, seul le paramètre P2 qui est la pénalité sur la variation de disparité de plus de 1 entre les pixels voisins à été passé de 64 à 96.



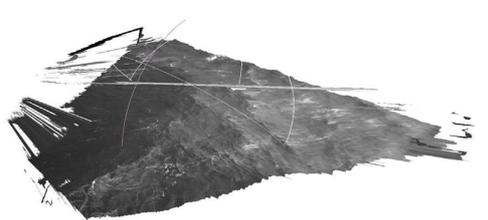
(A) Image gauche et droite rectifiées



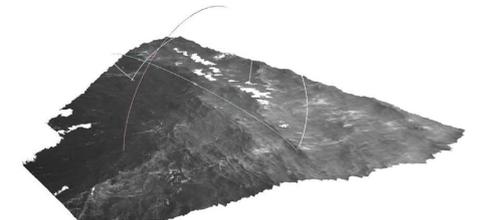
(B) Matrice de disparités non filtrée



(C) Matrice de disparités filtrée



(D) Nuage de points avec les lignes d'intersections non filtré



(E) Nuage de points avec les lignes d'intersections filtré



(F) Graphique des composantes connectées, la composante principale est en vert

FIGURE 2.5 – Différentes étapes de la chaîne de traitement WASS

3 Expérimentation

Une campagne de mesure a été réalisée afin de tester la technique de reconstruction par stéréo-vidéo au bassin d'essai. Pour ces essais la texture provenait de la poussière présente sur la surface, éclairé par des spots à LEDs puissants. Ayant commencé le projet de fin d'étude le 1^{er} mars, la partie expérimentation du 6 au 16 avril s'est imposée rapidement car des travaux de rénovation du bassin ont commencé le 19 avril et leur fin est prévue pour octobre 2021. Ce créneau étant le seul disponible durant tout le projet, des tests préliminaires ont été réalisés sur hexapode deux semaines avant pour vérifier certains paramètres d'installation du matériel afin de réduire les mauvaises surprises pouvant apparaître lors de la campagne de mesures.

3.1 Matériel utilisé

2 Caméras FASTCAM Mini AX



Source : Photron

- Type de Capteur : CMOS
- Taille du Capteur : 1024 x 1024
- Fréquence d'acquisition : 1 → 900 kHz
- Sensibilité lumineuse : ISO 40,000 monochrome
- Profondeur de couleurs : 12 bpp (bits/pixels)
- Mémoire interne : 32 Gbits

2 Objectifs 20mm



Source : Nikon

- Longueur focale : 20mm
- Ouverture maximum : f/1.8
- Ouverture minimum : f/16
- Faible distorsion

2 Objectifs 35mm



Source : Nikon

- Longueur focale : 35mm
- Ouverture maximum : f/1.8
- Ouverture minimum : f/16
- Faible distorsion

Filtres polarisant pour chaque objectif



Source : Nikon

- Réduction des réflexions sur l'eau.

2 Spots Lumineux MultiLed MT



Source : Clara Vision

- Puissance maximale : 50.000 Lm
- Déclenchement sur trigger : possible
- Différentes palettes de lentilles, ouverture : 15°, 25°, 45° et 75°
- Diagrammes de directivité : non fourni

3 Sondes à houle asservies

Les sondes asservies sont un moyen de mesure extrêmement fiable qui nous servira de référence afin d'y comparer les mesures stéréo-vidéos. Une sonde asservie en fonctionnement (Figure : 3.1) est peu intrusive (elle ne perturbe pas la houle car une pointe de seulement 1 mm de diamètre est enfoncée de 0.5 à 1 mm dans l'eau) et très précise (précision de 0.3 mm). Le principe de la sonde est d'asservir une tige à suivre la surface de l'eau. La position de la tige renseigne ainsi sur la hauteur de l'eau. Ce principe de mesure est détaillé en Annexe : C.



FIGURE 3.1 – Sonde à houle asservie en fonctionnement

3.2 Tests préliminaires sur hexapode

Lorsque l'on filme les particules sur la surface de l'eau éclairée par des projecteurs on observe un fond noir parsemé de points blancs (Figure 3.2.A). Cette texture ressemble quelque peu à un mouchetis. Comme les caméras fonctionnent en nuances de gris, nous avons décidé pour des raisons de simplicité et de disponibilité du matériel de réaliser un mouchetis noir sur une plaque blanche afin d'en simuler le négatif (photo en Figure 3.2.B).

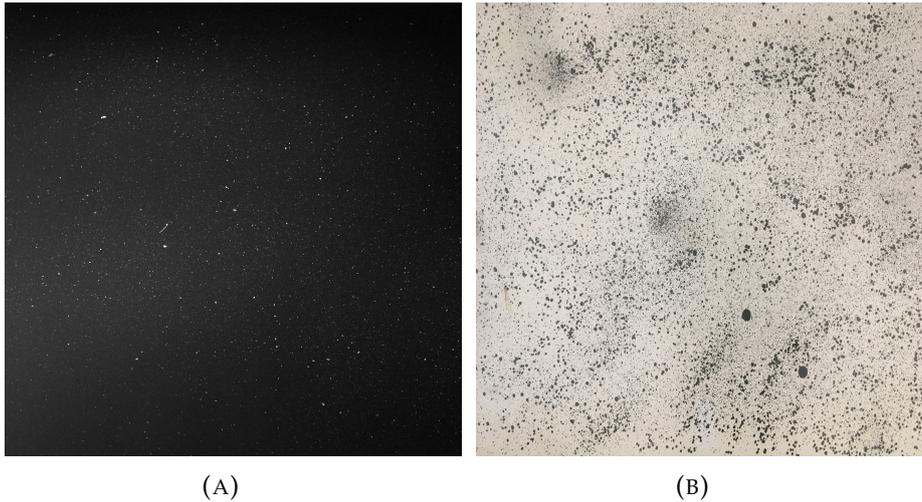


FIGURE 3.2 – (A) : Image d'une caméra regardant la surface de l'eau éclairée par un projecteur. (B) : Mouchetis réalisé sur une plaque pour générer une texture similaire.

Cette plaque a ensuite été fixée sur un système de positionnement motorisé de précision à 6 degrés de liberté appelé hexapode (photo en Figure 3.3.A). Cette plaque simule la surface de l'eau et pour se placer relativement dans la même configuration que si l'on était sur le bassin, la paire de caméras a été placée en hauteur sur la « mezzanine » du hangar avec une inclinaison de 35° par rapport à l'horizon. Les deux caméras sont écartées l'une de l'autre de 60 cm (photo en Figure 3.3.B).



FIGURE 3.3 – (A) : Mouchetis collé sur l’hexapode. (B) : Montage hangar, caméras placées en hauteur en haut à droite.

3.2.1 Étalonnage

Pour l’étalonnage, le damier a été positionné à l’horizontale (Figure 3.4.A) et à la verticale (Figure 3.4.B). L’ensemble des images ayant servi à l’étalonnage sont en Annexe : A.

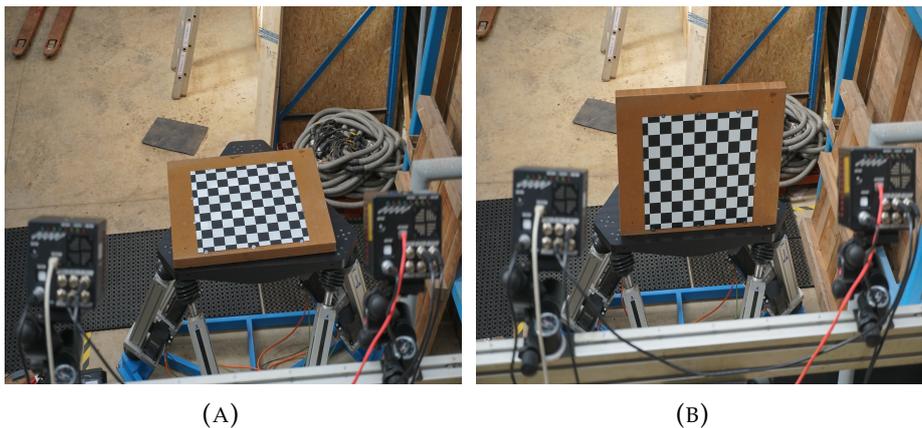


FIGURE 3.4 – (A) : Damier à l’horizontale sur l’Hexapode. (B) : Damier à la verticale sur l’Hexapode.

En utilisant la Toolbox Matlab de (BOUGUET, 2015) et en suivant dans un premier temps "First calibration example - Corner extraction, calibration, additional tools" puis "Fifth calibration example - Calibrating a stereo system, stereo image rectification and 3D stereo triangulation" nous obtenons les paramètres d’étalonnage en Tableau : 3.1, 3.2 et 3.3. On peut remarquer la qualité des objectifs aux paramètres de distorsions quasiment nuls.

| | | | | | |
|---------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Longueur focale (f_c) | 1735.98 ± 3.39 | 1734.90 ± 3.85 | | | |
| Point central (cc) | 528.90 ± 5.01 | 528.12 ± 4.89 | | | |
| Distortion (kc) | -0.099 ± 0.007 | 0.116 ± 0.037 | 0.002 ± 0.001 | 0.002 ± 0.001 | 0.000 ± 0.000 |

TABLE 3.1 – Tests préliminaires, Paramètres intrinsèques de la caméra de gauche

| | | | | | |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Longueur focale (fc) | 1736.73 ± 3.47 | 1734.92 ± 3.93 | | | |
| Point central (cc) | 529.04 ± 6.06 | 525.06 ± 4.98 | | | |
| Distortion (kc) | -0.097 ± 0.007 | 0.100 ± 0.046 | 0.001 ± 0.001 | 0.003 ± 0.001 | 0.000 ± 0.000 |

TABLE 3.2 – Tests préliminaires, Paramètres intrinsèques de la caméra de droite

| | | | |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Vecteur de Rotation (om) | 0.0020 ± 0.0019 | 0.0705 ± 0.0023 | 0.0531 ± 0.0003 |
| Vecteur de Translation (T) | -582.3 ± 1.1 | 25.6 ± 0.8 | -10.3 ± 7.2 |

TABLE 3.3 – Tests préliminaires, Paramètres extrinsèques

3.2.2 Résultats

En utilisant WASS sur une paire d'images prises avec le plateau à l'horizontale, la reconstruction en Figure : 3.5 a été réalisée. Cette vérification simple permet de se rassurer considérablement quant à la pseudo-texture des images, le matériel utilisé ainsi que les capacités de la chaîne de traitement, qui n'est initialement pas fait pour ce genre d'image.

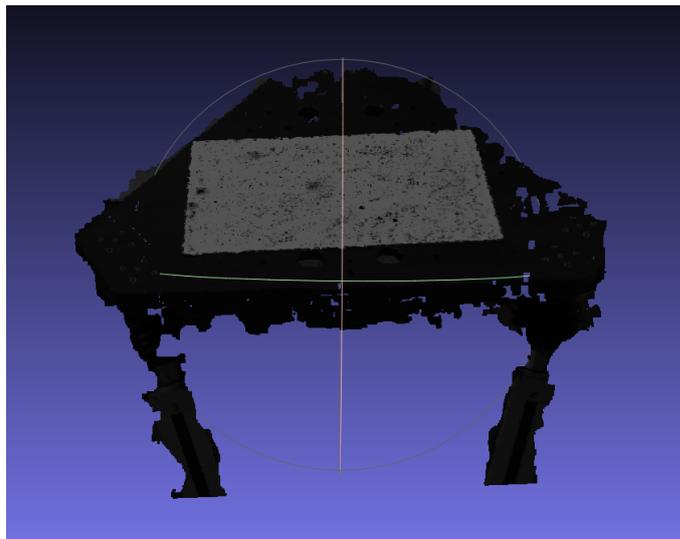


FIGURE 3.5 – Reconstruction de l'Hexapode à horizontale, vue des caméras, inclinaison des caméras -35°

Il faut maintenant s'imaginer qu'en essais hydrodynamiques, lorsque les vagues arriveront vers les caméras, leur face sera parfaitement exposée aux caméras mais leur dos le sera moins. On peut simuler cet effet en inclinant le plateau et estimer les limites entre l'inclinaison des caméras et la courbure des vagues. Les reconstructions sont présentées en Annexe : B. On y voit que le plateau incliné de -5° est très bien reconstitué (Figure : 3.6.A), qu'il commence à y avoir des trous dans la reconstruction à partir d'une inclinaison de -10° (Figure 3.6.B), et qu'à une inclinaison de -15° il y a autant de trous que de

surface reconstituée. Les caméras étant inclinées de -35° , on peut donc estimer qu'il faut au minimum un angle relatif de 25 à 30° entre l'inclinaison des caméras et la surface de l'eau à reconstituer.

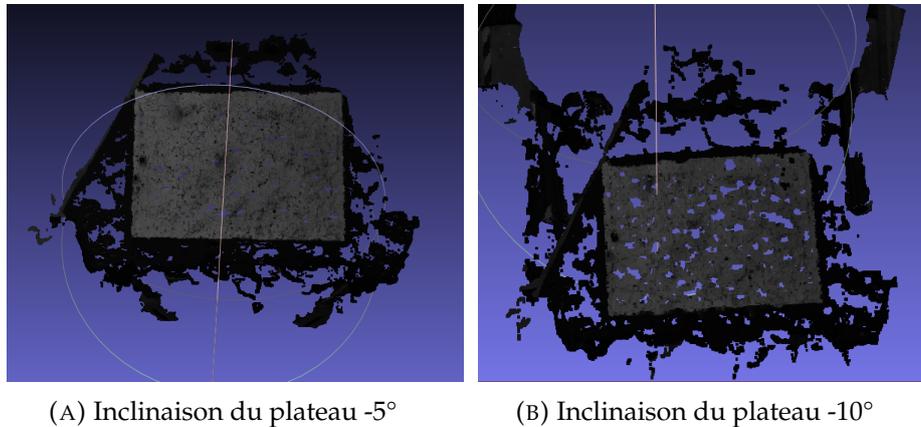


FIGURE 3.6 – Reconstruction de l'Hexapode suivant différentes inclinaisons, vue orthogonale au plateau

3.3 Campagne de mesures

3.3.1 Installation

Étant la première campagne de mesure de ce type, l'installation (en Figure 3.7) a été longue, environ 4 jours en incluant l'étalonnage. Deux passerelles mobiles, séparées de 6m, ont été placées en amont et en aval de la zone de mesure au milieu du bassin. Les deux caméras placées sur la passerelle en aval, face à la direction de propagation de la houle sont à une hauteur de 2.20m par rapport à l'eau, séparées par une « baseline » d'environ 60cm et sont inclinées de 45° (Figure : 3.8). Pour avoir une zone de reconstruction maximale, les caméras ont été positionnées de sorte que les lignes de pixels supérieures de leur image se superposent.

Les spots lumineux ont été placés en travers du bassin, de manière à éclairer la parois et non le fond du bassin (Figure : 3.8.B). Si le fond du bassin était éclairé, celui-ci se verrait sur les images des caméras et l'on reconstruirait le fond du bassin plutôt que la surface. Les spots sont à une hauteur de 1.20m, séparés de 90cm, au milieu des passerelles, décalés en latéral de 2.20m par rapport au milieu du bassin et sont inclinés de 20° par rapport à l'horizontale. Trois sondes à houles ont été installées afin de pouvoir comparer les mesures stéréos à une référence. Ces sondes à houles sont placées elles aussi au milieu des passerelles mais plus en retrait en latéral. Pour faire un noir total dans le bassin, les ouvertures lumineuses ont été fermées avec leurs volets ou à l'aide de cartons et des draps ont été installés au dessus de la zone de mesure pour stopper la réflexion de zones lumineuses venant des hublots du plafond. Le schéma de l'installation est présenté en Figure : 3.9.



FIGURE 3.7 – Montage de l'expérimentation, luminosité ambiante supérieur à celle lors des essais

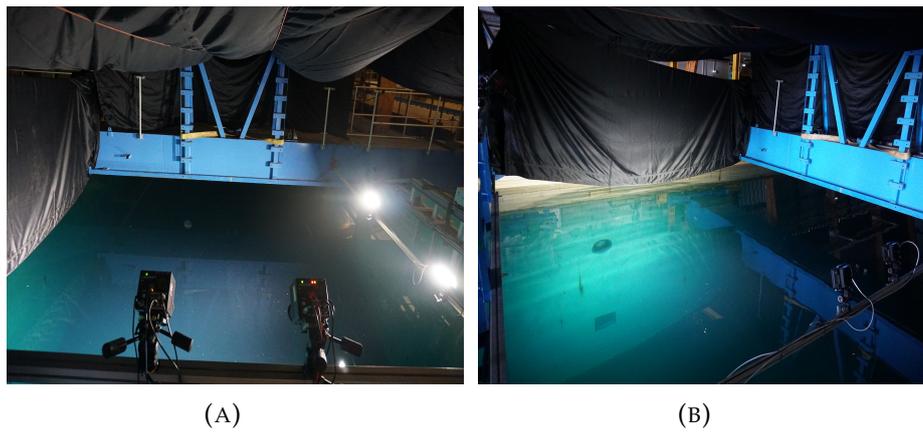


FIGURE 3.8 – (A) : Installation, vue dans le sens des caméras.
(B) : Spots éclairant le mur et non le fond du bassin

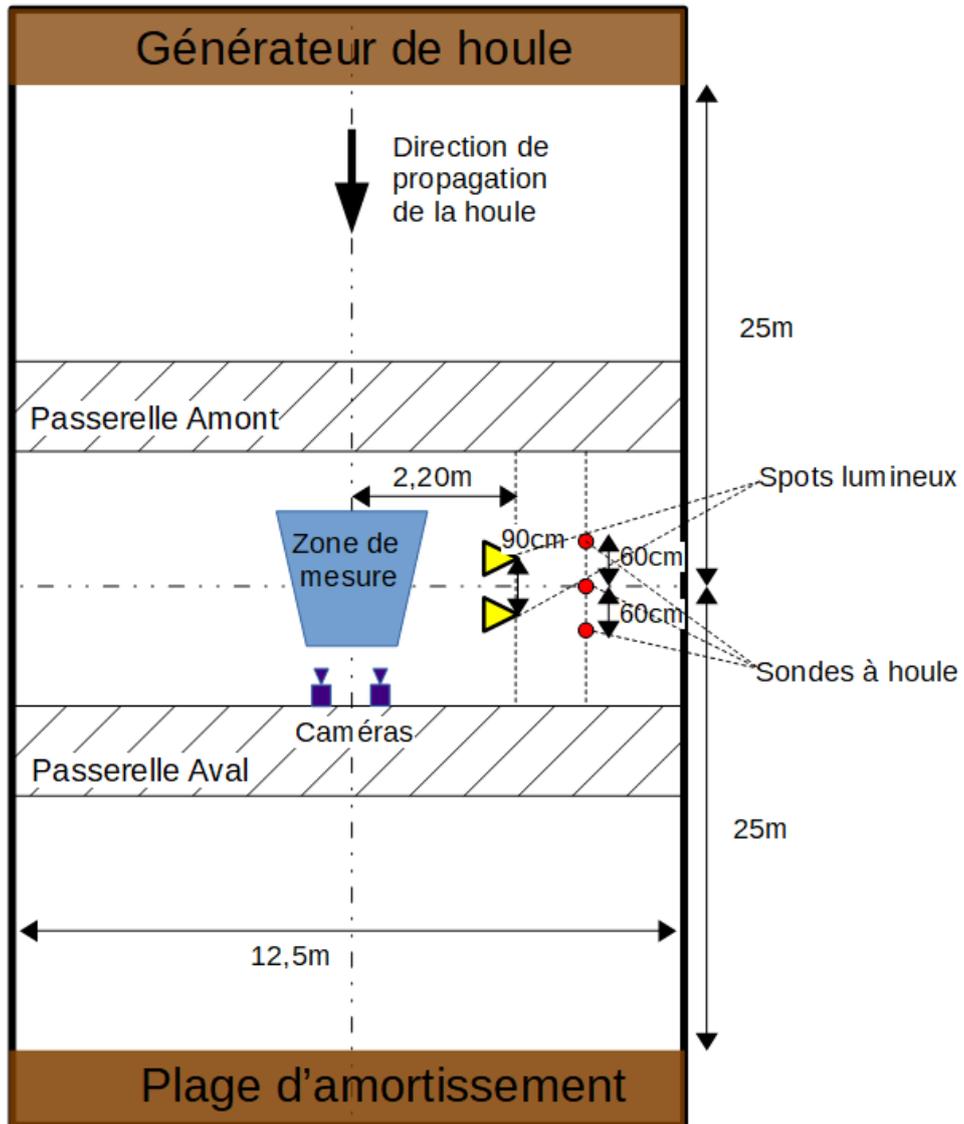
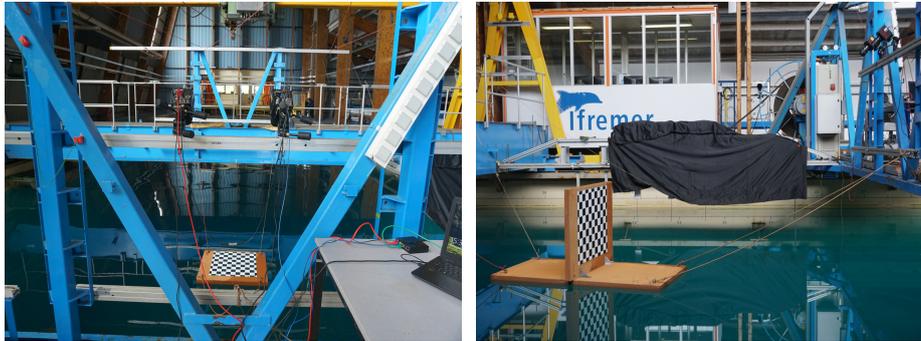


FIGURE 3.9 – Schéma de l'installation pour les essais

3.3.2 Étalonnage

L'étalonnage n'est pas simple ici car il faut déplacer un damier sur l'eau. Pour cela le damier a été monté sur un bloque de mousse flottant avec trois inclinaisons possibles : à l'horizontal Figure : 3.10.A, à environ 45° et à la vertical Figure : 3.10.B.



(A) Damier à l'horizontal, vue dans le sens des caméras

(B) Damier à la vertical, vue latéral du bassin

FIGURE 3.10 – Étalonnage des caméras pour la campagne de mesure

Comme lors de la précampagne, la Toolbox Matlab de (BOUGUET, 2015) a été utilisée sur une 15^{ème} d'images. Cependant, comme on peut le voir sur les incertitudes, les résultats des paramètres intrinsèques (Tableau : 3.4, 3.5) ne sont pas du tout aussi bon que ceux obtenus lors des tests préliminaires. On remarque en particulier les valeurs aberrantes de la distorsion et du centre optique, tout comme les très fortes valeurs d'incertitudes.

| | | | | | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|
| Longueur Focale (fc) | 1743.79 ± 48.04 | 1753.82 ± 48.14 | | | |
| Point central (cc) | 374.06 ± 32.97 | 629.32 ± 45.72 | | | |
| Distortion (kc) | 0.010 ± 0.044 | -0.312 ± 0.183 | 0.002 ± 0.004 | -0.020 ± 0.006 | 0.000 ± 0.000 |

TABLE 3.4 – Paramètres intrinsèques de la caméra de gauche

| | | | | | |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|
| Longueur Focale (fc) | 1827.05 ± 45.91 | 1869.44 ± 43.81 | | | |
| Point central (cc) | 308.23 ± 30.89 | 699.80 ± 58.24 | | | |
| Distortion (kc) | -0.014 ± 0.047 | 0.007 ± 0.128 | 0.028 ± 0.005 | -0.027 ± 0.007 | 0.000 ± 0.000 |

TABLE 3.5 – Paramètres intrinsèques de la caméra de droite

| | | | |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Vecteur de Rotation (om) | 0.0227 ± 0.0153 | 0.1551 ± 0.0139 | 0.0376 ± 0.0034 |
| Vecteur de Translation (T) | -555.97 ± 8.26 | -58.05 ± 8.59 | 232.58 ± 31.92 |

TABLE 3.6 – Paramètres extrinsèques

Ces mauvais paramètres d'étalonnage induisent une torsion lors de la reconstruction de la surface du bassin qui devrait être plane (Figure : 3.11). Il

se trouve que la partie "Fifth calibration example - Calibrating a stereo system, stereo image rectification and 3D stereo triangulation" recalcule les paramètres intrinsèques des caméras, cependant si l'on décide de ne pas les recalculer, les résultats sont bien meilleurs (Figure : 3.12).

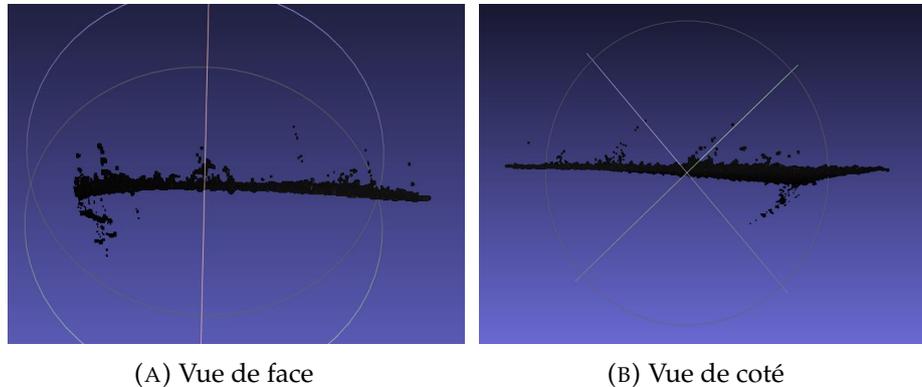


FIGURE 3.11 – Reconstruction de la surface du bassin avec de mauvais paramètres d'étalonnages.

| | | | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|------------|-----------|---------------|
| Longueur Focale (fc) | 1716.05 ± ? | 1717.63 ± ? | | | |
| Point central (cc) | 498.94 ± ? | 513.05 ± ? | | | |
| Distortion (kc) | -0.104 ± ? | 0.077 ± ? | -0.001 ± ? | 0.001 ± ? | 0.000 ± 0.000 |

TABLE 3.7 – Paramètres intrinsèques de la caméra de gauche, sans recalcul

| | | | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|------------|-----------|---------------|
| Longueur Focale (fc) | 1720.47 ± ? | 1721.15 ± ? | | | |
| Point central (cc) | 500.44 ± ? | 500.34 ± ? | | | |
| Distortion (kc) | -0.111 ± ? | 0.116 ± ? | -0.001 ± ? | 0.001 ± ? | 0.000 ± 0.000 |

TABLE 3.8 – Paramètres intrinsèques de la caméra de droite, sans recalcul

| | | | | | |
|-----------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|--|--|
| Vecteur de Rotation (om) | -0.0170 ± 0.0010 | 0.1216 ± 0.0014 | 0.0298 ± 0.0001 | | |
| Vecteur de Translation (T) | -566.31 ± 3.80 | -22.40 ± 2.85 | 52.78 ± 2.61 | | |

TABLE 3.9 – Paramètres extrinsèques, sans recalcul des paramètres intrinsèques

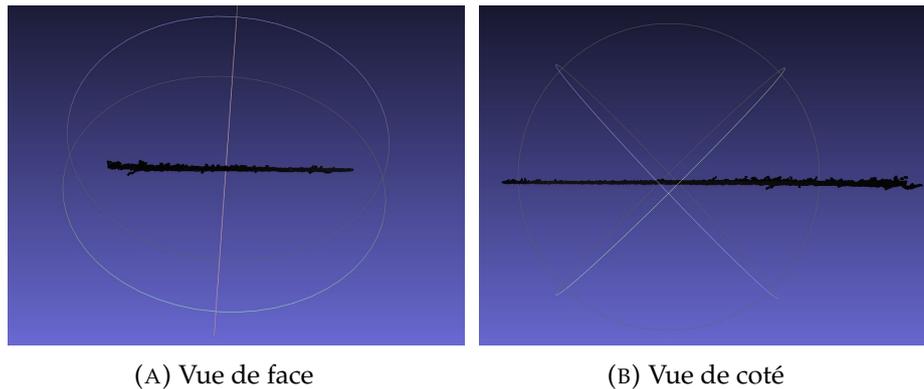


FIGURE 3.12 – Reconstruction de la surface du bassin avec les paramètres intrinsèques non recalculés.

3.3.3 Essais hydrodynamiques

Les essais ont réellement commencé le lundi de la seconde semaine de campagne et ont duré jusqu'au vendredi midi. Dans un premier temps les objectifs de 35mm ont été montés sur les caméras puis le mercredi les objectifs ont été remplacés par ceux de 20mm. Avoir différents objectifs permet de changer la taille de la zone de reconstruction ainsi que la résolution spatiale (taille d'un pixel projeté sur la zone mesurée), les caractéristiques des zones reconstruites sont présentées en Figure : 3.13.

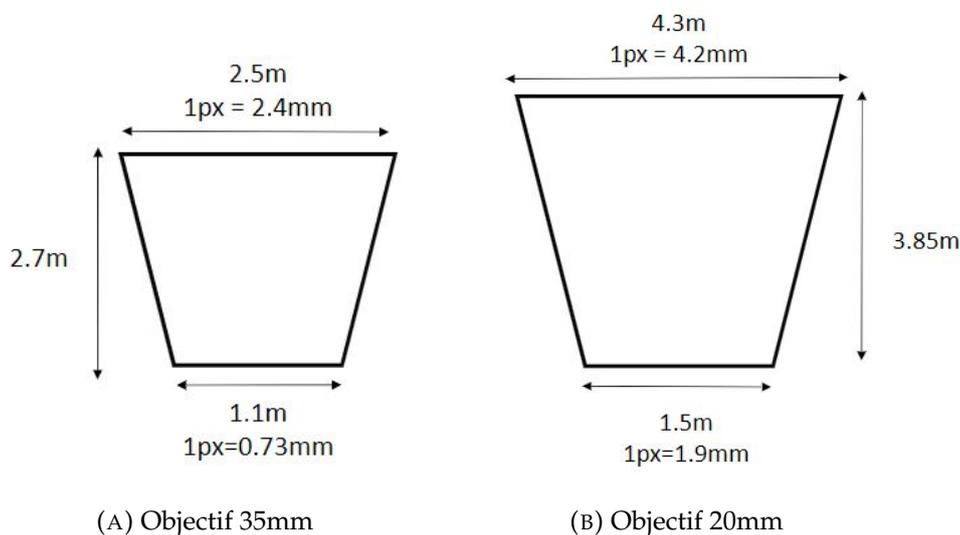


FIGURE 3.13 – Taille de la zone de reconstruction théorique maximum, avec les tailles des pixels sur la surface mesurée

Un essai hydrodynamique se déroule en plusieurs étapes. Au début, le bassin est calme. On peut alors donner au générateur de houle la consigne de s'actionner afin de générer une houle régulière ou irrégulière. Quand le batteur reçoit la consigne d'une houle régulière par exemple, il va se mettre en

action afin de générer la houle d'amplitude A et de période T . Pour ne pas le brusquer et générer une houle propre, on lui indique d'atteindre l'amplitude de houle voulue en suivant une rampe d'environ quatre ou cinq oscillations. La houle générée va se propager dans l'axe du bassin à une vitesse appelée vitesse de groupe v_g qui dépend de la pulsation ω et du nombre d'onde k . La longueur du bassin D_B faisant 50m et notre zone de mesure étant à 25m, la houle va mettre approximativement un temps t_{25m} à arriver, (équation : 3.1). La houle va continuer son trajet et venir se « casser » sur la plage d'amortissement 25m plus loin. Elle n'est cependant pas totalement amortie et va se réfléchir et repartir vers le générateur de vague. On aura donc sur la zone de mesure un mélange d'ondes incidentes et d'ondes réfléchies environ $2.t_{25m}$ après l'arrivée du premier front d'onde.

$$t_{25m} = \frac{D_B/2}{v_g} = \frac{2.k.D_B/2}{\omega} = \frac{T.D_B}{\lambda} \quad (3.1)$$

$$t_{25m} \approx \frac{T.D_B}{1,56.T^2} = \frac{D_B}{1,56.T} = \frac{50}{1,56T}$$

Quelques notions indispensables :

- La vitesse à laquelle se déplace le front d'onde, appelée vitesse de groupe v_g :

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d\sqrt{gk}}{dk} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{g}}{\sqrt{k}} = \frac{1}{2} \frac{\omega}{\sqrt{k}\sqrt{k}} = \frac{1}{2} \frac{\omega}{k} \quad (3.2)$$

- La vitesse à laquelle se déplacent les crêtes des vague dans le groupe, appelée vitesse de phase v_ϕ :

$$v_\phi = \frac{\omega}{k} = 2.v_g \quad (3.3)$$

- La pulsation ω :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3.4a)$$

$$\omega = \sqrt{gk} \quad (3.4b)$$

- Le nombre d'onde k :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.5)$$

- La longueur d'onde λ :

$$\lambda = T.v_\phi \quad (3.6)$$

En profondeur considérée infinie, on a :

$$\lambda \approx 1,56.T^2 \quad (3.7)$$

4 Analyse et discussion

4.1 Passage dans le repère du bassin

4.1.1 Passage en coordonnées dimensionnel

Lorsqu'un essai est traité par WASS, (section : 2.5.2, « Chaîne de traitement ») nous obtenons un nuage de points dans le repère « rectifié » normalisé de la caméra de gauche : $(O_c, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ (section : 2.4, *Triangulation*). La première étape est donc de faire le produit des coordonnées des points du nuage par la norme du vecteur de translation afin de passer en coordonnées dimensionnelles : $(O_c, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = ||T|| * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

4.1.2 Passage dans le plan du bassin

Pour se déplacer du repère des caméras $(O_c, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$, vers un repère $(O_{B'}, \vec{X}_{B'}, \vec{Y}_{B'}, \vec{Z}_B)$ où les vecteurs $X_{B'}$ et $Y_{B'}$ sont dans le plan du bassin. On estime un plan d'une reconstruction où la surface libre du bassin est plan et immobile. A partir de 2 vecteurs unitaires $e_1(e_{1x}, e_{1y}, e_{1z})$, $e_2(e_{2x}, e_{2y}, e_{2z})$ orthogonaux appartenant au plan, un vecteur unitaire normal au plan $e_3(e_{3x}, e_{3y}, e_{3z})$ et un point $O_{B'}$ appartenant au plan.

On forme la matrice de rotation Z :

$$Z = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{2x} & e_{3x} \\ e_{1y} & e_{2y} & e_{3y} \\ e_{1z} & e_{2z} & e_{3z} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

On effectue le changement de repère suivant :

$$\begin{bmatrix} X_{B'} \\ Y_{B'} \\ Z_B \end{bmatrix} = Z^T * \left[O_c O_{B'} + \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \right] \quad (4.3)$$

4.1.3 Alignement avec l'axe du bassin

Grâce au changement de repère précédent, nous avons les axes $\vec{X}_{B'}$ et $\vec{Y}_{B'}$ dans le plan du bassin mais pas dans les bonnes directions. On souhaite en effet avoir l'axe \vec{X}_B dans le sens de propagation de la houle.

Nous ne pouvons malheureusement pas utiliser une transformée de Fourier pour retrouver la direction de la houle car les longueurs d'onde générées par le batteur à houle sont trop grandes pour voir apparaître deux longueurs d'ondes sur les reconstructions. Notre fenêtre d'échantillonnage spatiale n'est pas assez grande.

On peut par contre estimer la direction de propagation des vagues en faisant l'hypothèse que la surface libre peut être approximé par la sinusoïdale suivante :

$$Z_{B_{th\grave{e}o}} = A. \cos(k. [\cos(\theta).X_{B'} - \sin(\theta).Y_{B'}] + \Phi) \quad (4.4)$$

où :

- θ : Angle de propagation de l'onde
- Φ : Phase de l'onde
- k : Nombre d'onde
- A : L'amplitude de l'onde.

Le solveur non linéaire de Matlab a été utilisé pour estimer les quatre paramètres $\{A, k, \theta, \Phi\}$ associés à une dizaine de reconstruction d'un même essai. Nous avons ensuite utilisé la valeur médiane de θ estimés comme direction de propagation. A noter que l'essai utilisé pour cela présentait une longueur d'onde assez courte (Figure : 4.1).

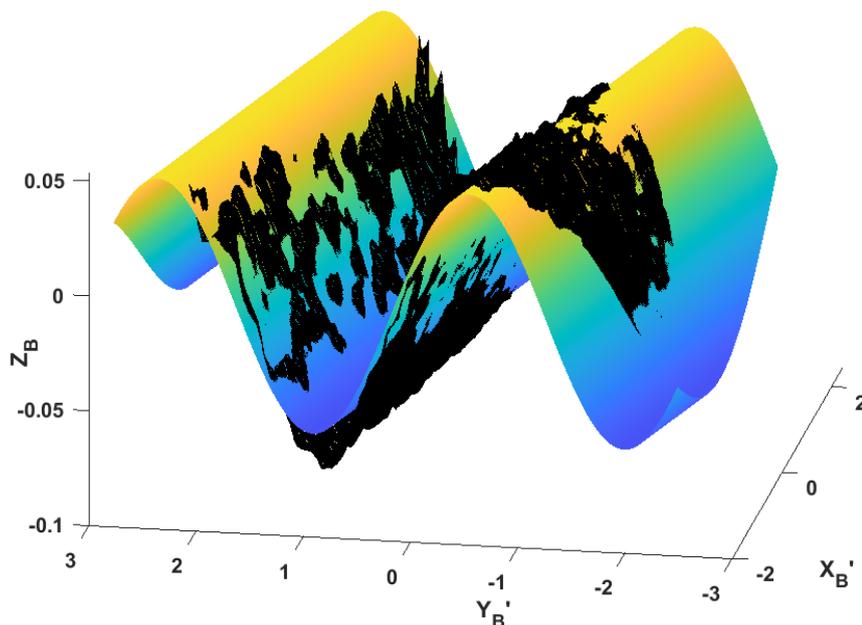


FIGURE 4.1 – Comparaison entre un sinus généré à partir des coefficients estimés avec le solveur (en couleur) et les mesures d'une reconstruction (en noir)

On tourne le repère $(O_{B'}, \vec{X}_{B'}, \vec{Y}_{B'}, \vec{Z}_B)$ autour de \vec{Z}_B de l'angle θ afin d'avoir un nouveau repère $(O_{B'}, \vec{X}_B, \vec{Y}_B, \vec{Z}_B)$ avec axe \vec{X}_B dans le sens de propagation de la houle.

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = R_z(\theta) * \begin{bmatrix} X_{B'} \\ Y_{B'} \\ Z_B \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

$$\text{où : } R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

4.1.4 Déplacement de l'origine du repère

Afin d'avoir une correspondance entre les mesures stéréos et les trois sondes à houles, on déplace l'origine du repère le long de l'axe \vec{X}_B afin que la sonde à houle centrale soit à $X_B = 0$. Les deux autres sondes sont à plus et moins 60cm.

Trouver de combien il faut se décaler le long de l'axe \vec{X}_B , en manipulant des nuages de points serait trop compliqué. On va donc interpoler le nuage de points sur une grille régulière avec une maille de 1cm par 1cm. On moyenne ensuite le long de l'axe \vec{Y}_B car la houle a théoriquement la même hauteur le long de l'axe \vec{Y}_B . Cela permet de ramener le problème originellement à quatre dimensions (trois en espace, une en temps) à seulement trois (deux en espace, une en temps).

On utilise de nouveau le solveur Matlab en cherchant à minimiser les trois écarts ΔZ_n entre les mesures des sondes et trois points espacés de 60cm appartenant à la courbe des mesures stéréo (Figure : 4.2). Le solveur va rechercher quelle position sur l'axe \vec{X}_B est celle qui présente un minimum entre les trois points. Cependant, comme notre courbe de mesures stéréo est discontinue (une valeur par cm) il faut en plus interpoler cette courbe aux points sur lesquels le solveur cherche à diminuer l'écart. Afin d'être précis on fait travailler le solveur sur un jeu de 500 reconstructions (correspondant à 500 instants d'un même essai).

La fonction que cherche à minimiser Matlab en faisant varier $f(1)$ ressemble à ceci :

$$\begin{aligned} \text{func} = & @(f) \text{sum}((\text{interp2}(x\text{Axis}, t\text{Axis}, \text{ZdMeanAlongY}, f(1) - 600, t\text{Axis}) - \text{MesSondeAmont}).^2) + \dots \\ & \text{sum}((\text{interp2}(x\text{Axis}, t\text{Axis}, \text{ZdMeanAlongY}, f(1), t\text{Axis}) - \text{MesSondeMilieu}).^2) + \dots \\ & \text{sum}((\text{interp2}(x\text{Axis}, t\text{Axis}, \text{ZdMeanAlongY}, f(1) + 600, t\text{Axis}) - \text{MesSondeAval}).^2); \end{aligned} \quad (4.6)$$

où :

- **xAxis** : Tableau 1D des valeurs de l'axe \vec{X}_B .
- **tAxis** : Tableau 1D des valeurs de l'axe du temps.
- **ZdMeanAlongY** : Tableau 2D de valeurs d'élévations (Z) des reconstructions en fonction du temps et de l'axe \vec{X}_B .

- **MesSondeAmont, MesSondeMilieu, MesSondeAval** : 3 tableaux 1D des valeurs d'élévations de référence des sondes asservies.
- **f(1)** : Valeur sur l'axe \vec{X}_B que Matlab va chercher à optimiser.
- ± 600 : Écart des sondes Amont et Aval à celle du milieu.

On ne sait pas exactement où se trouve l'origine du repère sur l'axe \vec{Y}_B mais ce n'est pas un problème car les houles générées ont la même hauteur sur l'axe \vec{Y}_B .

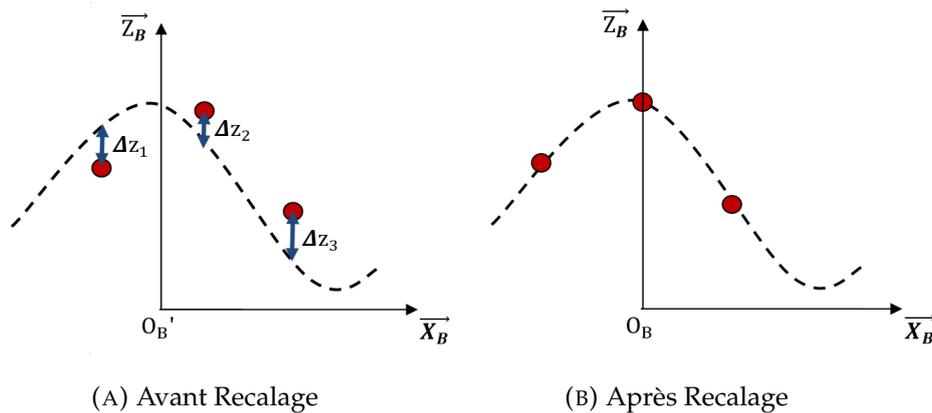


FIGURE 4.2 – Déplacement de l'origine du repère le long de l'axe \vec{X}_B . En rouge : les 3 sondes à houle, en noir pointillé : reconstruction de la houle moyennée sur l'axe \vec{Y}_B

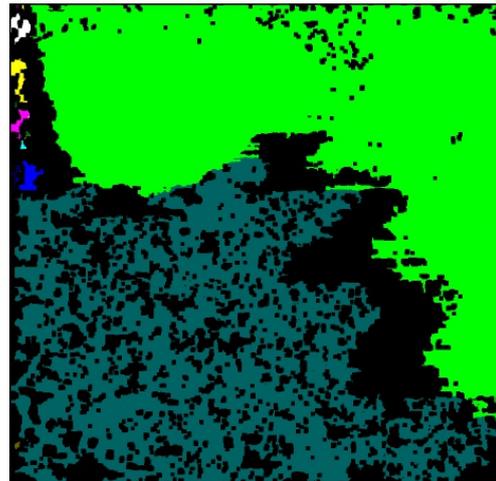
4.2 Reconstruction avec les objectifs de 35mm

4.2.1 Taille de la zone de reconstruction

Les images provenant des caméras étant en 12bits, il faut les convertir en 8 ou 16 bits afin de travailler avec. Si on exporte les images en 8 bits, on diminue la qualité et la taille prise par les images mais l'on perd trop d'information. Un export en 16 bits va augmenter la taille prise par les images sans augmenter ni amoindrir la qualité de celles-ci. Il se trouve que le passage en 8 bits fait perdre beaucoup trop d'information dans notre cas, on peut le voir en comparant les résultats obtenus par WASS avec des images de 8 ou 16 bits (Figure 4.3). Les reconstructions utilisant les images en 16bits sont bien meilleures mais ne couvrent malheureusement pas l'intégralité de l'image. Le haut de l'image est bien reconstruite mais pas le bas.



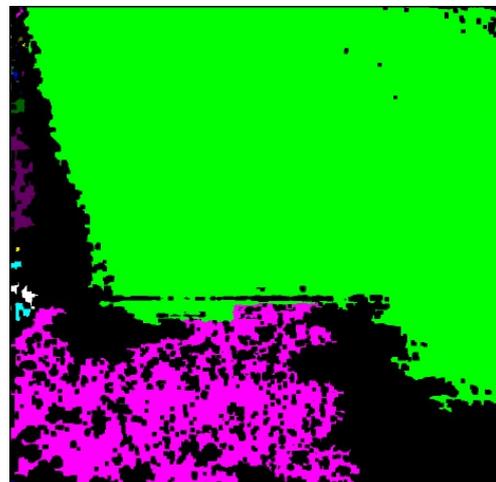
(A) Matrice de disparités, à partir d'image en 8bits



(B) Graphique des composantes connectées, à partir d'image en 8bits



(C) Matrice de disparités, à partir d'image en 16bits



(D) Graphique des composantes connectées, à partir d'image en 16bits

FIGURE 4.3 – Résultats de WASS sur une paire d'images en 8 et 16 bits.

4.2.2 Reconstruction Statique

Après avoir changé de repère le nuage de points de la reconstruction et effectué son interpolation sur une grille régulière de maillage 1cm par 1 cm, on obtient la Figure : 4.4. En analysant la distribution des erreurs sur une 100^{aine} de reconstructions statiques, on obtient un écart type σ de 3.56 mm (Figure : 4.5). Si l'on regarde la Figure : 4.6.A, on peut voir que l'écart type est important au fond de la zone de mesure (vers les X négatifs) et diminue lorsque l'on se rapproche des caméras (vers les X positifs). Cela semble être en lien avec la taille d'un pixel projeté sur la zone de mesure, ce qui est vérifié avec la Figure : 4.7 qui présente la distribution des erreurs en fonction de 4 gammes de taille de pixels différentes. On ne voit par contre rien de particulier suivant l'axe Y en Figure : 4.6.B. Le fait d'avoir toutes les sources lumineuses du

même coté (en Y positif) ne semble donc pas influencer la mesure dans les zones reconstruites.

Sur la reconstruction illustrée à la Figure 4.4, il semble y avoir plus de bruit au fond de la reconstruction (haut de l'image), loin des caméras et ceci semble s'atténuer en se rapprochant des caméras. Pour vérifier cela, on définit 5 zones d'analyse sur la Figure : 4.8.A et on effectue les FFT sur les axes Y, que l'on moyenne par bande de valeurs en X et que l'on remoyenne sur 100 reconstructions statiques. On obtient la densité spectrale de puissance en dB en Figure : 4.8.B. On voit sur celle-ci que la zone la plus loin des caméras, Amont 2 en bleu, est généralement plus bruitée que les autres et que la zone la plus proche, Aval 2 en vert, est généralement moins bruitée.

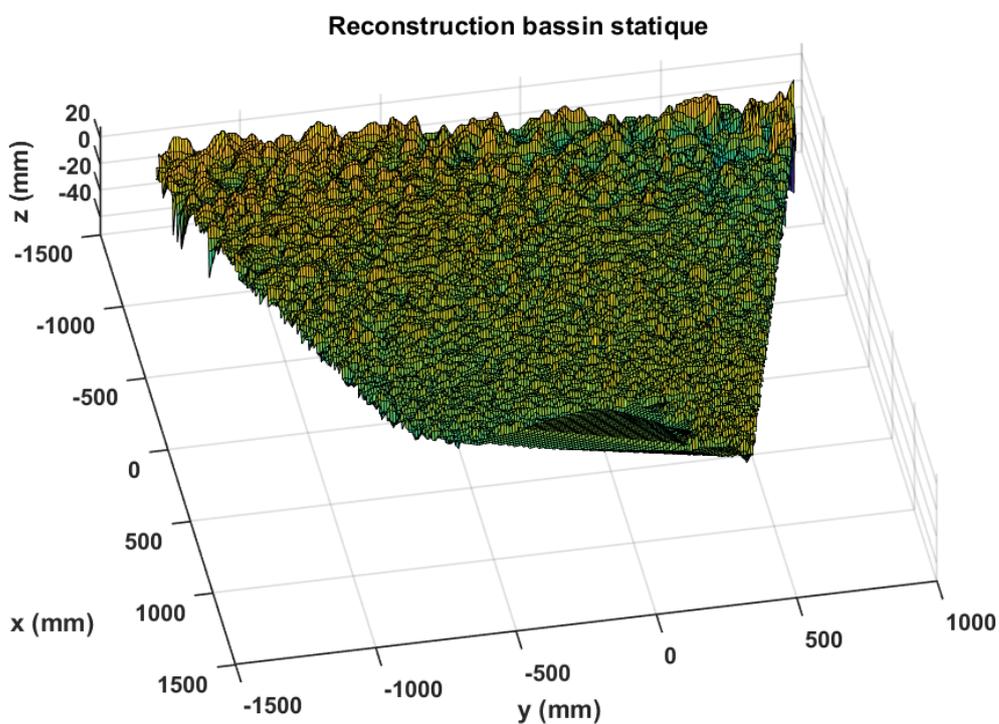


FIGURE 4.4 – Reconstruction du bassin statique

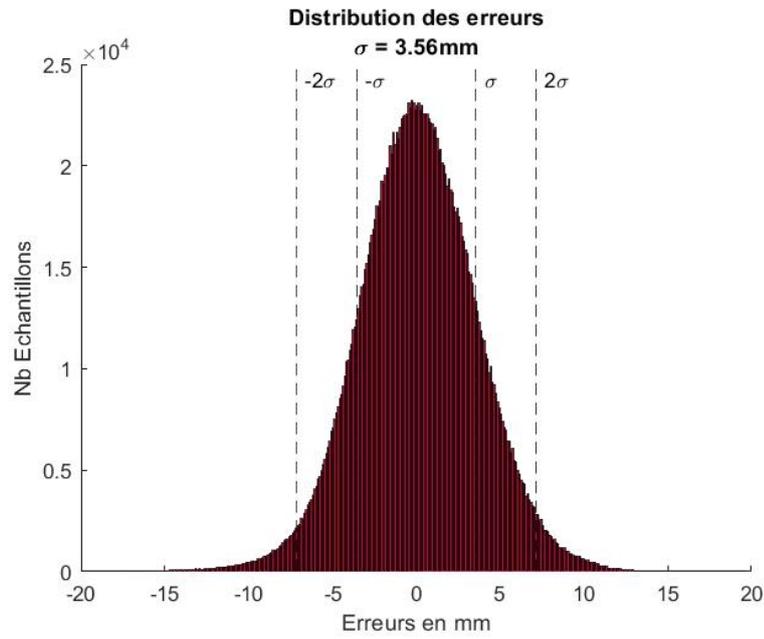


FIGURE 4.5 – Distribution des erreurs

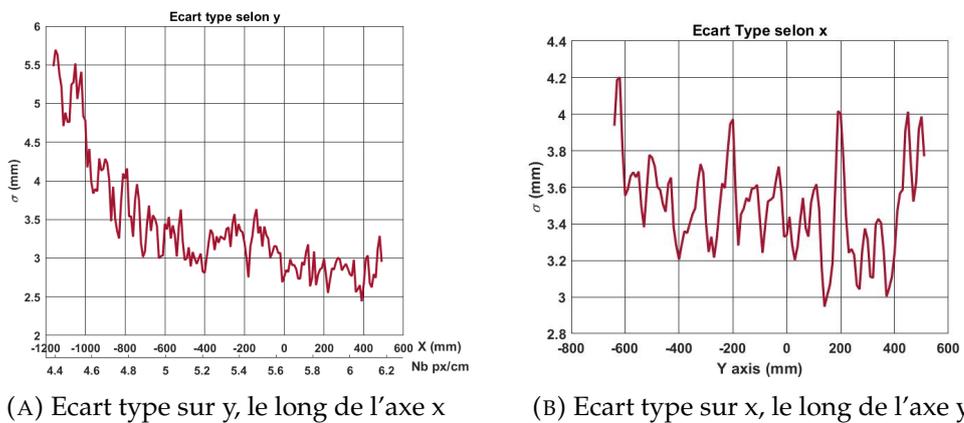


FIGURE 4.6 – Variation des écarts types suivant les axes X et Y

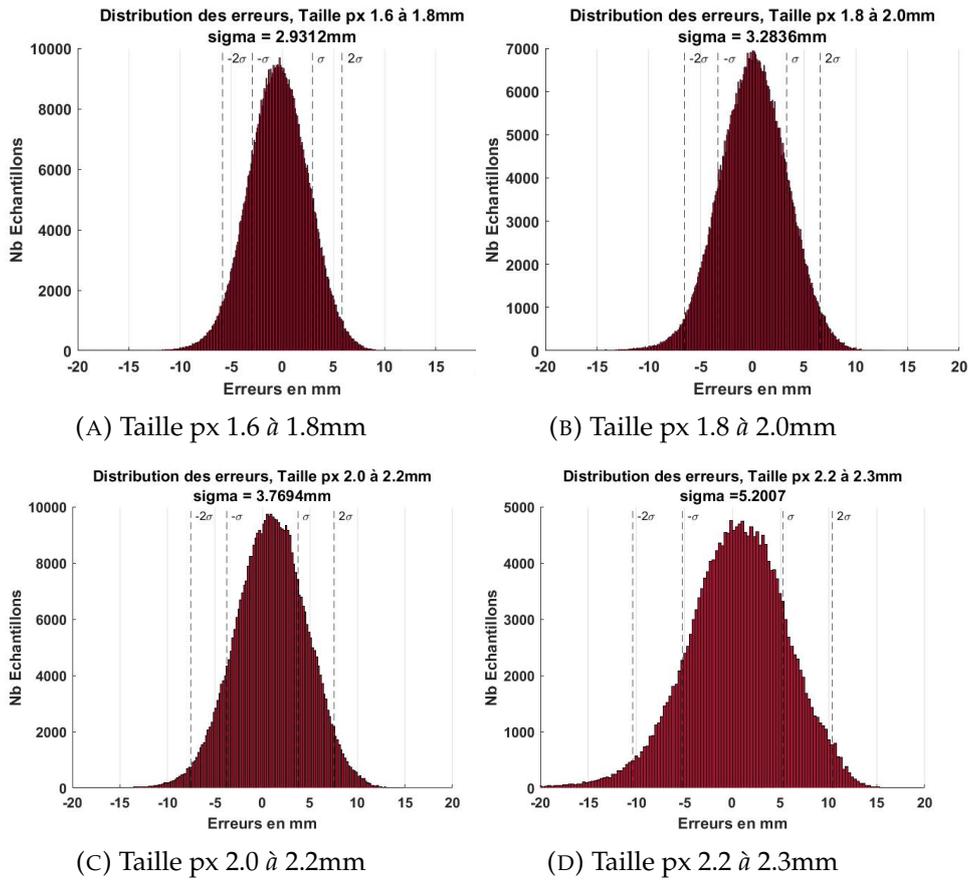
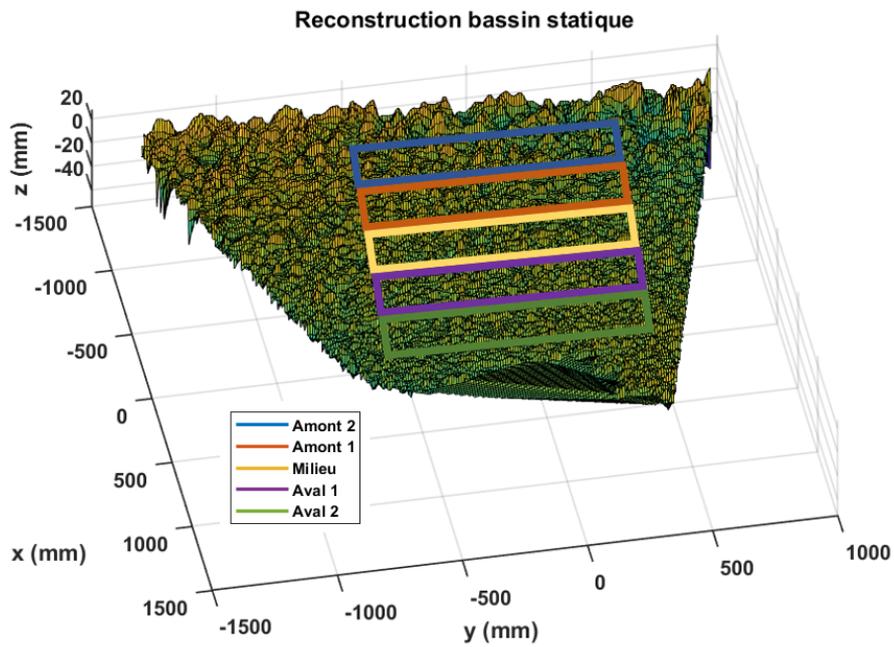
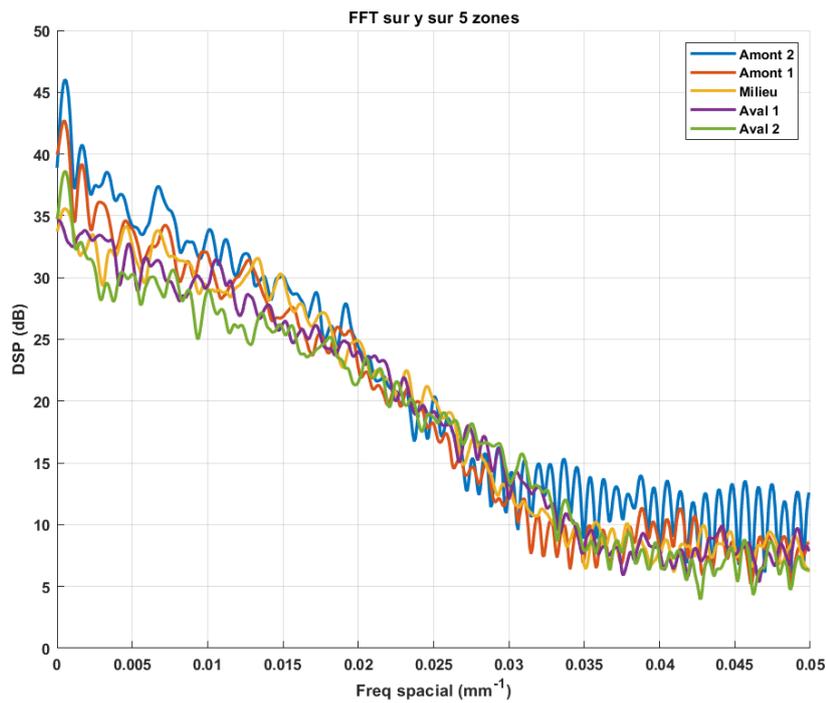


FIGURE 4.7 – Distribution des erreurs suivant la taille des pixels



(A) Représentation des 5 zones sur lesquelles des FFT ont été effectués



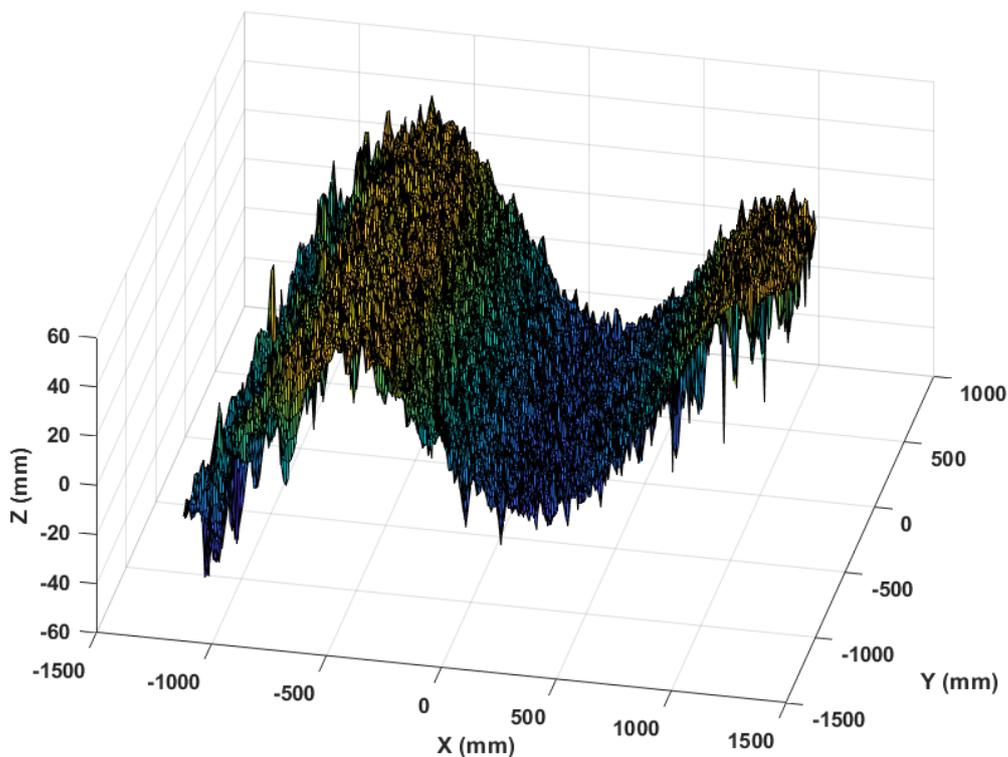
(B) Densité Spectrale de Puissance

FIGURE 4.8 – Densité Spectrale de Puissance obtenue en effectuant une FFT sur les 5 zones, moyennée par zone sur l'axe X et moyennée sur 100 reconstructions.

4.2.3 Reconstruction Dynamique

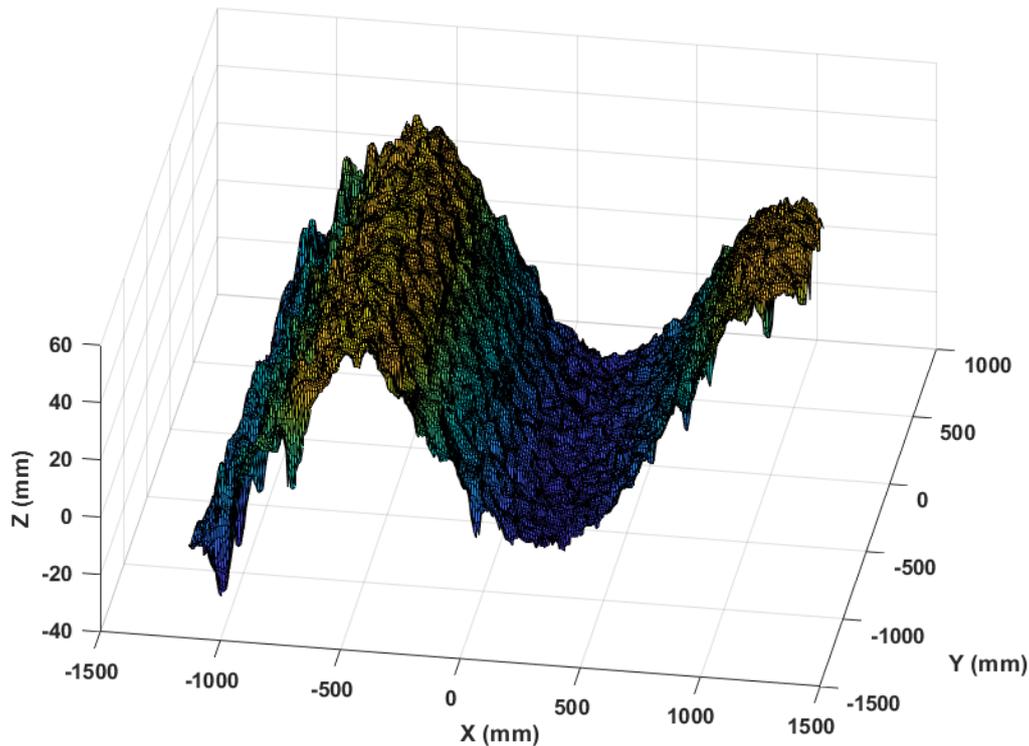
Les essais sont filmés à une fréquence de 50 Hz avec 2 caméras de 1Mpx avec une profondeur de couleurs de 12 bits en nuance de gris. Donc un pixel fait 1.5 octet et une image fait 1.5 Mo, ce qui fait qu'un enregistrement d'une minute fait 9 Go. Afin d'économiser l'espace mémoire disponible, les essais ne sont pas tous enregistrés en entier mais on enregistre au moins 2s au début de l'essai quand la surface libre est encore statique et entre 10 et 20 périodes de houle.

Les reconstructions dynamiques sont très satisfaisantes, comme on peut le voir en Figure : 4.9.A avec la mesure stéréo non filtrée de la surface du bassin, l'amplitude de la houle est seulement de 6,2cm crête à creux. Cette reconstruction est agréable visuellement car la période est assez petite pour voir une longueur d'onde entière. On a cependant l'impression qu'il y a beaucoup de bruit, cela est uniquement dû à l'échelle. On peut tout de même filtrer cette mesure avec un filtre médian avec pour élément structurant une matrice de taille 5x5 afin de supprimer au maximum les points adhérents. Voici un exemple de reconstruction filtrée en Figure : 4.9.B. Notre résolution spatiale passe donc à 5cm, ce qui reste très correct étant donné l'étendue de la mesure.



(A) Interpolation non filtrée

FIGURE 4.9 – Reconstruction dynamique d'un train de vagues régulières de périodes 1s et d'amplitudes 6.2cm crête à creux



(B) Interpolation avec un filtre median avec pour élément structurant une matrice 5x5

FIGURE 4.9 – Reconstruction dynamique d’un train de vagues régulières de périodes 1s et d’amplitudes 6.2cm crête à creux (cont.)

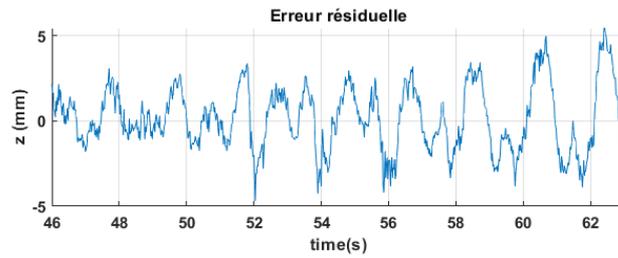
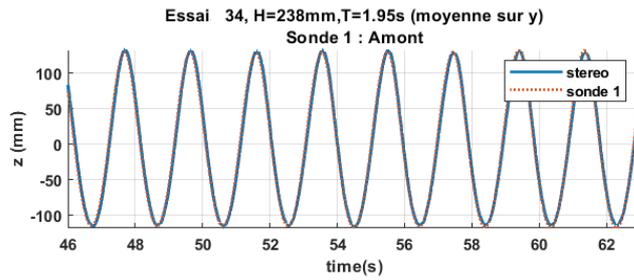
Après l’interpolation des nuages de points sur une grille régulière, les résultats sont structurés sous forme de matrice 3D avec comme axes : X, Y et le temps, les données dans les matrices sont les valeurs Z d’élévation de la surface.

La Figure : 4.10 présente une comparaison entre les mesures des sondes à houle et les mesures stéréos sans filtrage mais moyennées sur l’axe Y. Pour réaliser ce graphique, les valeurs qui sont comparées à la sonde en amont sont le contenu de la matrice 3D en $X=-600\text{mm}$ puis moyennées le long de l’axe Y afin d’avoir une matrice 1D d’élévation en fonction du temps. Il en est de même pour la sonde du milieu avec $X=0$ et la sonde aval avec $X=+600\text{mm}$. Nous sommes ici sur une houle de 238mm crête à creux et de période 1.95s. On peut voir sur les trois graphiques que les courbes se superposent quasiment parfaitement, la différence entre les deux courbes ($Z_{stereo} - Z_{sonde}$), appelée « Erreur résiduelle » est affichée juste en dessous. L’erreur résiduelle est satisfaisante car elle reste dans les $\pm 5\text{mm}$.

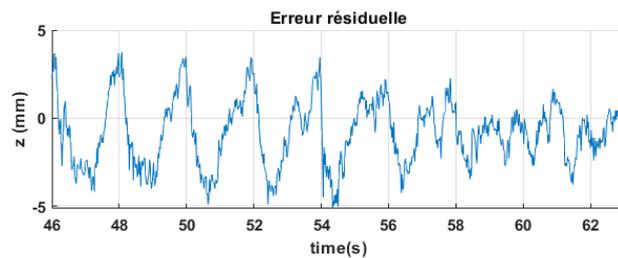
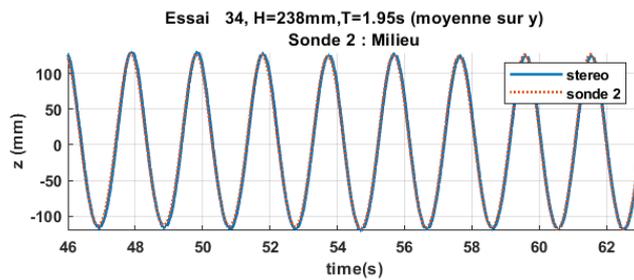
Si l’on désire maintenant regarder les valeurs ni filtrées ni moyennées, il faut arbitrairement choisir certains endroits sur l’axe Y car afficher l’intégralité des courbes rendrait le graphique illisible. La Figure 4.11, représente donc les élévations de la surface en $Y=\{-400,-200,0,200,400\}\text{mm}$. On peut voir que

l'erreur résiduelle reste d'environ $\pm 10\text{mm}$, excepté pour les mesures face à la sonde en amont qui sont plus bruitées, ce que l'on avait aperçu sur les reconstructions statiques. Pour diminuer ce bruit un filtre médian 5×5 a été appliqué à l'interpolation, on peut voir en Figure 4.12 que l'erreur est presque revenue à ce qu'elle était sur les valeurs moyennées de la Figure 4.10. Aucun filetage temporel n'a été appliqué et les résultats sont excellents.

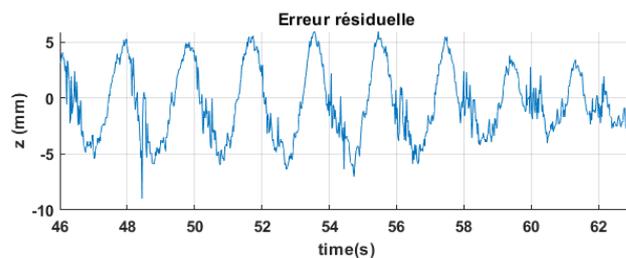
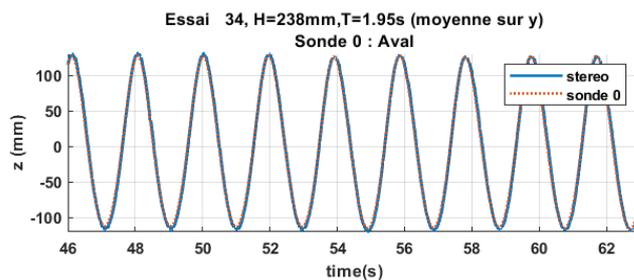
Cet essai n'est pas un cas isolé comme le montre la Figure 4.13, où sont représentés les rapports d'amplitude en ordonnée entre la sonde centrale et les mesures stéréos avec un filtrage médian 5×5 en $X=0$ et $Y=[-400,-200,0,200,400]\text{mm}$ et la fréquence de la houle en abscisse pour des essais d'amplitudes différentes. Les résultats sont excellents entre 12 et 36cm, l'erreur est inférieure à 3%. Il en est de même pour l'essai d'amplitude 6.2cm, 10% d'erreur représente une erreur moyenne de 6mm, ce qui reste très correct. Par contre on atteint aussi 10% d'erreur sur l'essai de hauteur 55cm ce qui est étonnant, en général plus l'amplitude est grande, plus le rapport d'erreur sera faible. Il y a donc un autre phénomène qui est entré en jeu.



(A) Amont

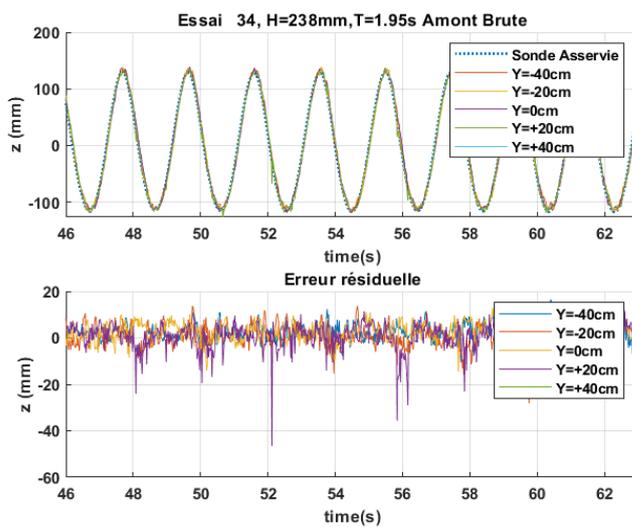


(B) Milieu

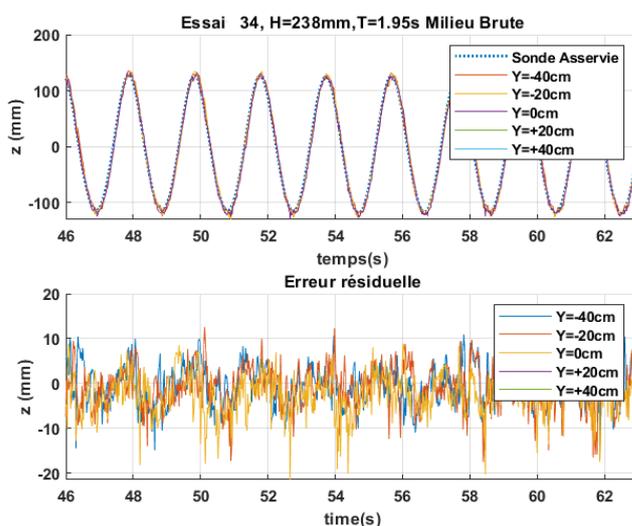


(C) Aval

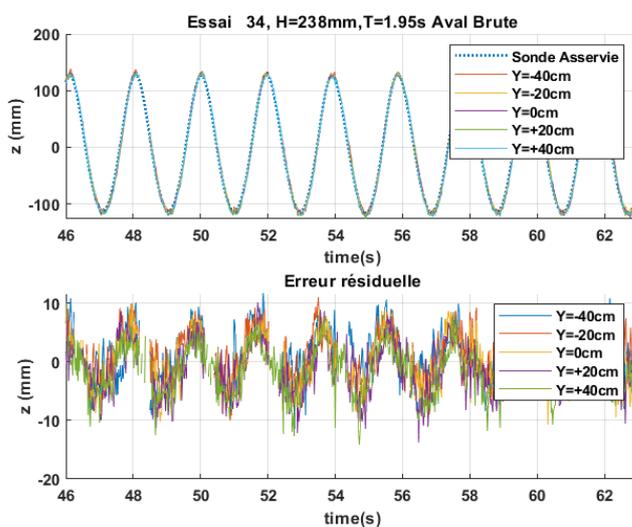
FIGURE 4.10 – Comparaisons entre la mesure des sondes et la mesure stéréo (valeurs moyennées sur Y).



(A) Amont

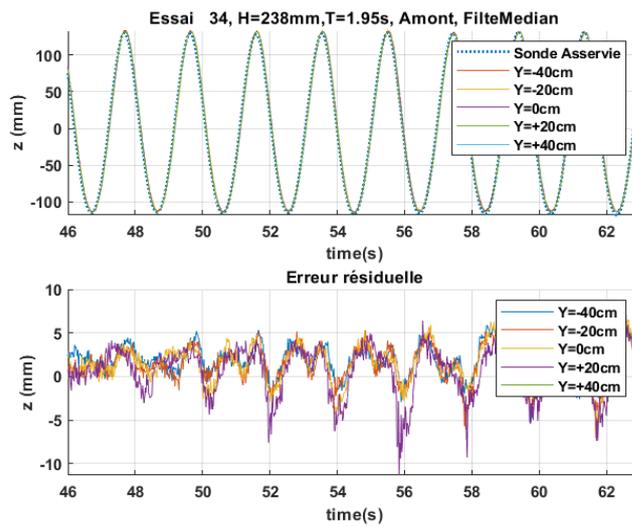


(B) Milieu

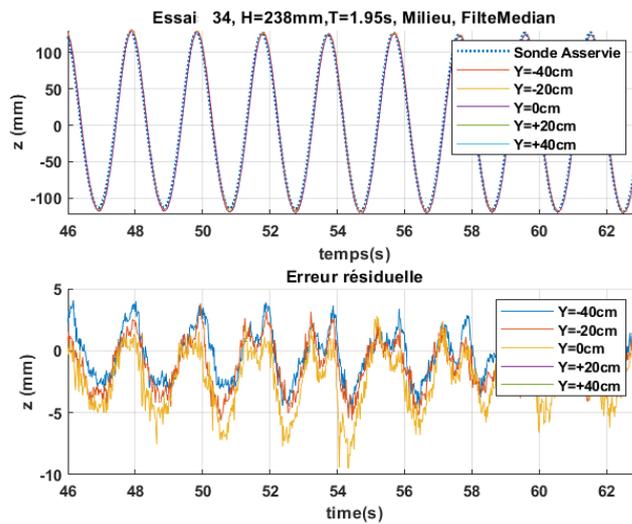


(C) Aval

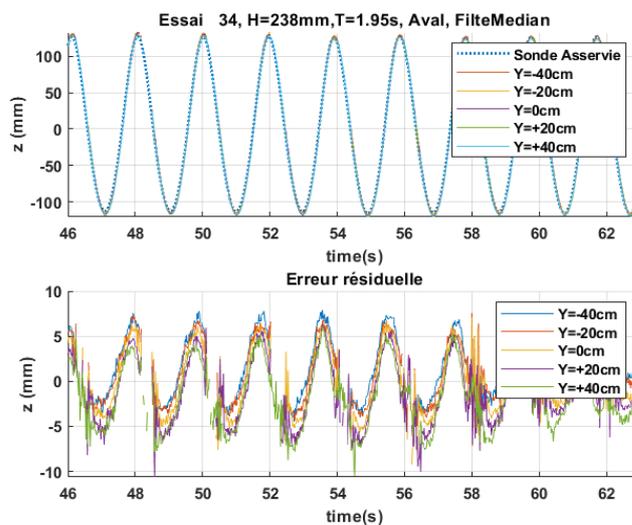
FIGURE 4.11 – Comparaison entre la mesure des sondes et la mesure stéréo en des points particuliers sans filtrage.



(A) Amont



(B) Milieu



(C) Aval

FIGURE 4.12 – Comparaison entre la mesure des sondes et la mesure stéréo en des points particuliers avec filetage médian 5x5

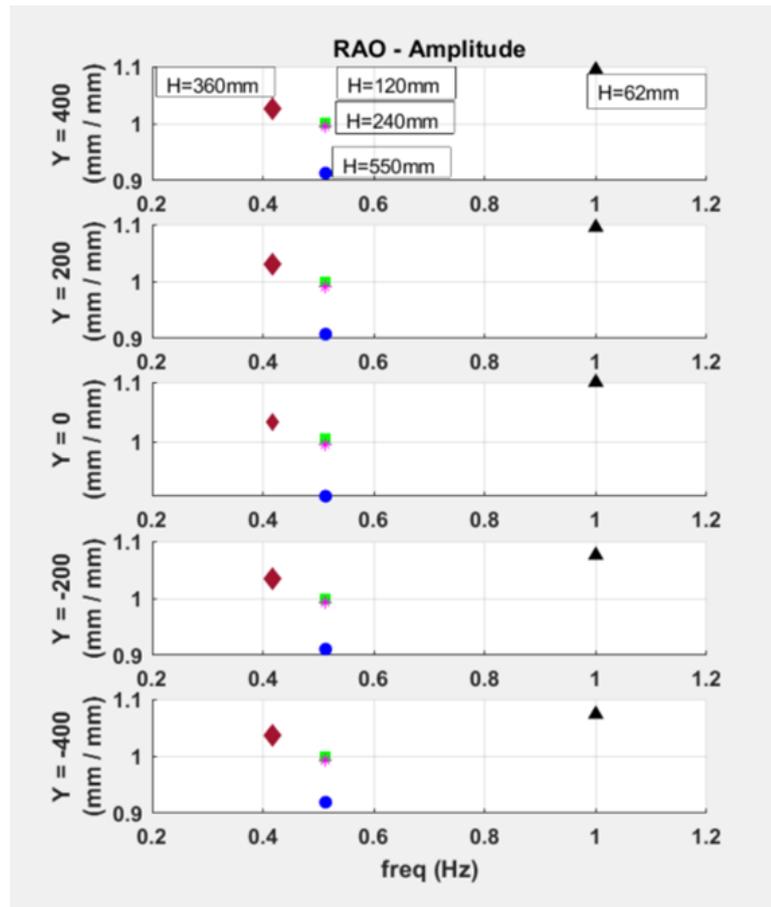


FIGURE 4.13 – Rapport d’amplitude entre les mesures stéréo en $X=0$ et $Y=[-400,-200,0,200,400]$ mm et la sonde à houle milieu.

4.3 Reconstruction avec les objectifs de 20mm

Sur la fin de la campagne d’essai, les objectifs de 20mm ont été montés pour essayer de reconstruire une zone plus grande. Malheureusement, comme la résolution est inférieure, les particules de poussière très petites étaient moins visibles sur l’image et seulement quelques essais où beaucoup de particules étaient présentes ont pu être reconstruite de manière satisfaisante. Cette partie ne s’attardera donc pas autant sur l’analyse que la précédente car les quelques fois où les reconstructions ont pu être réalisé ne sont pas assez représentatives pour prendre du recul quant à la fidélité et la justesse de la mesure.

4.3.1 Taille de la zone de reconstruction

Lorsque les reconstructions sont bien faites, elles se font sur quasiment l’intégralité de l’image, figure 4.14. La partie haute de l’image n’est pas aussi bien éclairée que le reste, c’est sans doute pour cela qu’elle n’a pas été reconstruite, il n’y a pas assez de texture sur les images. On voit bien la disparité

augmenter (niveaux de gris) du haut vers le bas de l'image. (Pour rappel, les colonnes du haut de l'image sont superposées (vue à l'infini) et un décalage apparaît entre les colonnes sur les formes plus proches.)

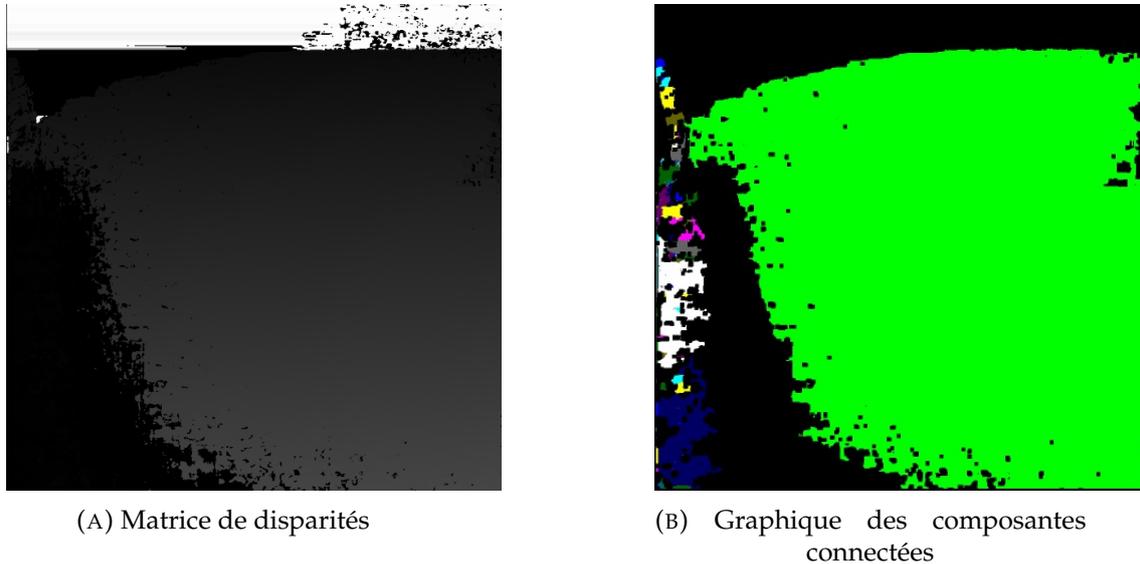


FIGURE 4.14 – Zone de reconstruction avec l'objectif de 20mm

4.3.2 Reconstruction Statique

La reconstruction statique, Figure 4.15 pourrait sembler moins bruitée qu'avec l'objectif de 35mm mais ce n'est pas le cas, c'est une impression d'échelle qui est passé de 60 à 200mm. On voit cette fois-ci qu'il y a énormément de bruit sur la droite et la gauche de la reconstruction. La Figure 4.16.A, montre que la distribution des erreurs a fortement augmenté entre l'objectif de 35 et 20mm en passant d'un écart type $\sigma=3,56\text{mm}$ à $\sigma = 9,6\text{mm}$. Cette valeur très élevée est due aux nombreuses erreurs sur les bords des reconstructions. Sur la figure 4.16.B, où l'écart type ne prend pas en compte les bords, on retombe à une valeur de $\sigma=4,4\text{mm}$.

On voit très bien l'écart type qui augmente fortement sur les côtés avec la figure 4.17.A qui représente l'évolution de l'écart type le long de l'axe Y. Comme avec l'objectif de 35mm, il semble y avoir un lien entre l'augmentation de l'écart type et l'agrandissement des pixels (vers les X négatifs) sur la figure 4.17.B, il ne faut pas trop tenir compte des valeurs supérieures à 1500 sur l'axe X, qui doivent être en lien avec les zones limites de reconstruction et non de la taille des pixels.

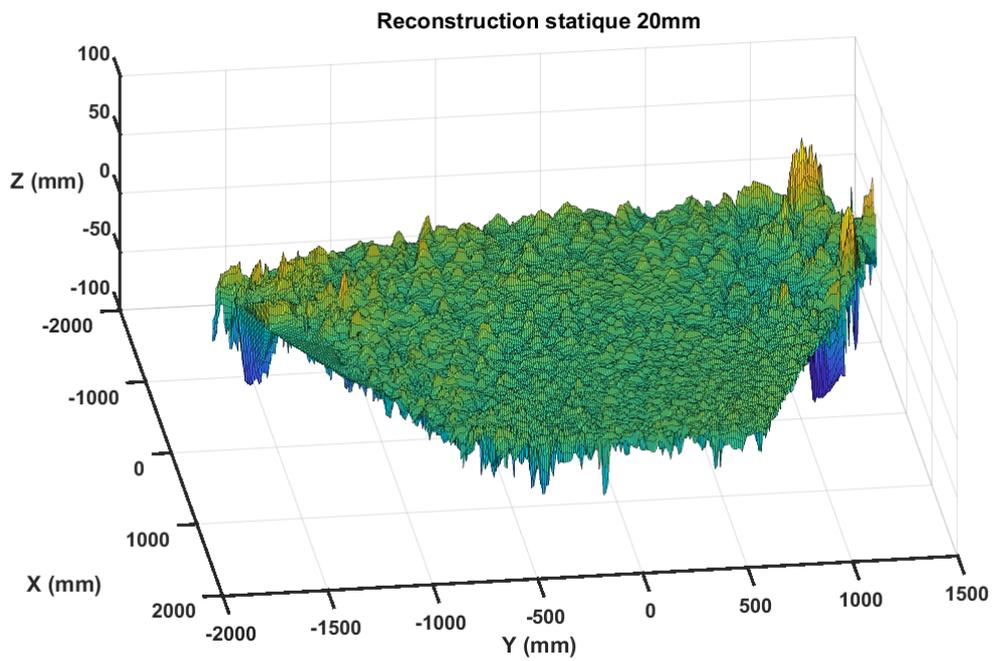
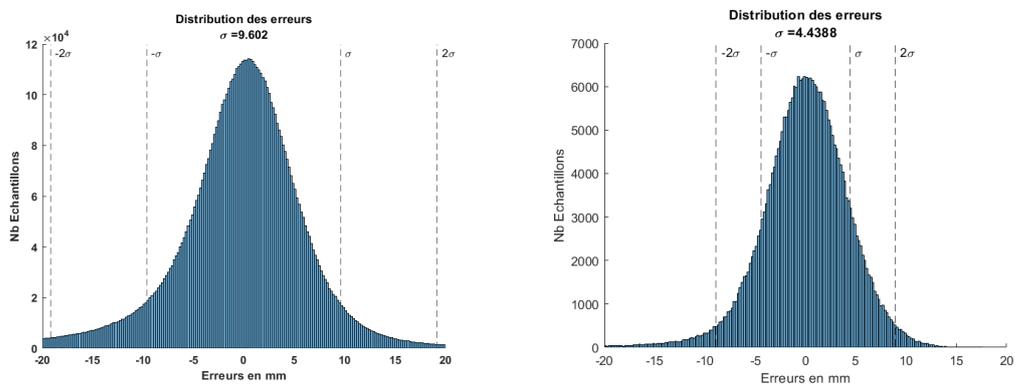


FIGURE 4.15 – Reconstruction statique du bassin



(A) Distribution des erreurs sur l'intégralité de la reconstruction

(B) Distribution des erreurs entre $Y = \pm 750\text{mm}$

FIGURE 4.16 – Distribution des erreurs sur une 100^{ème} de reconstruction avec l'objectif de 20mm

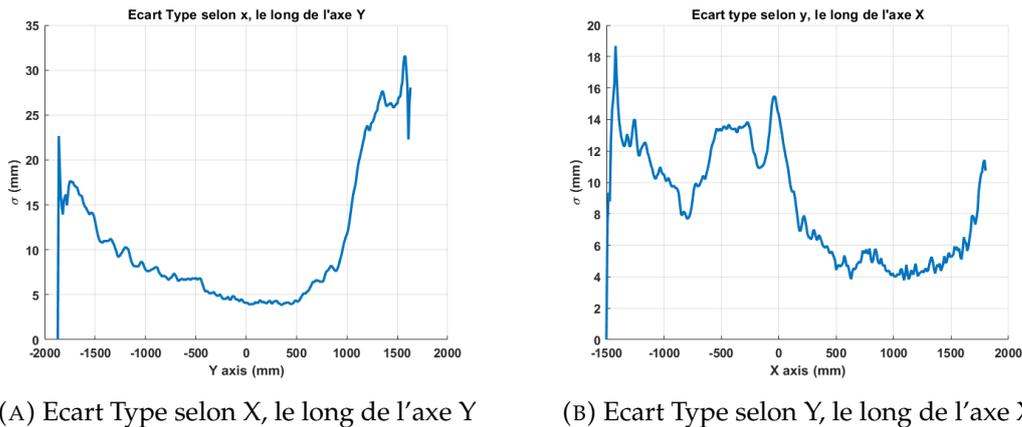


FIGURE 4.17 – Evolution des écarts types suivant X et Y sur une 100^{aine} de reconstruction avec l'objectif de 20mm

4.3.3 Reconstruction Dynamique

Sur la Figure 4.18, qui a été reconstruite sur la totalité de l'essai, on peut voir que les erreurs résiduelles augmentent une première fois vers 30s puis une seconde fois vers 55s. Cette seconde augmentation des erreurs pourraient être dûe à la réflexion des premières vagues sur la plage d'amortissement. D'après la relation (3.1), le temps que la houle parte se réfléchir et revienne est de $2 \cdot \frac{50}{1,56T}$, soit environ 20s pour une période de 3,2s. La houle arrive vers 25s sur la zone de mesure et donc les premières réflexions apparaîtront à partir d'environ 45s, ce qui pourrait être cohérent avec l'augmentation de l'erreur car la surface de l'eau n'aura plus la même élévation sur l'axe Y.

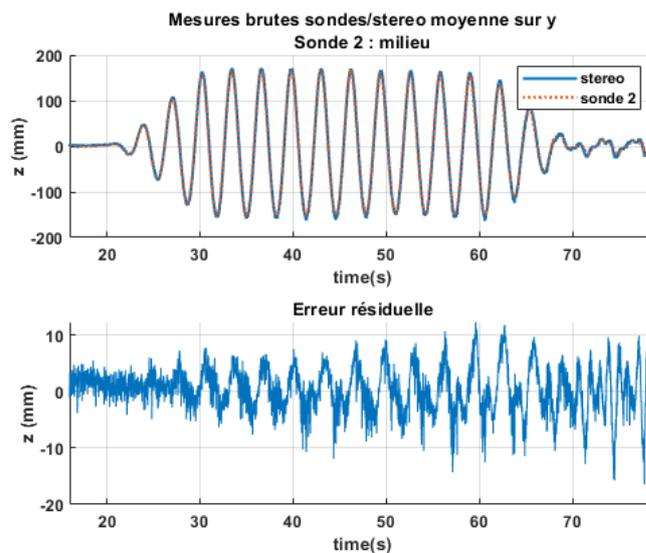


FIGURE 4.18 – Essai 51, H=320mm, T=3.2s, reconstruction sur l'intégralité de l'essai

4.4 Bilan

Les résultats obtenus pour une première campagne d'essai sont très satisfaisants, surtout pour les objectifs de 35 millimètres où l'erreur de mesure reste dans les plus ou moins 5mm avec un filtrage spatial et sans filtrage temporel. On s'aperçoit cependant qu'en passant à des objectifs de 20mm, la taille et la quantité des particules présentes sur la zone de mesure est un paramètre extrêmement important pour les reconstruction. Malheureusement ce n'est pas un paramètre maîtrisable. Il faut donc chercher une solution pour générer de la texture en surface dont l'échelle pourrait être ajustée à la résolution des caméras.

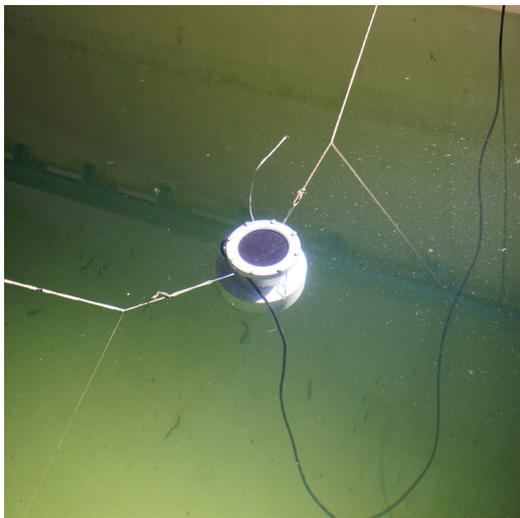
Il reste aussi encore un travail à effectuer sur l'optimisation des paramètres de WASS afin de maximiser la taille des zones de reconstruction en fonction des objectifs.

5 Génération de texture par acoustique sous-marine

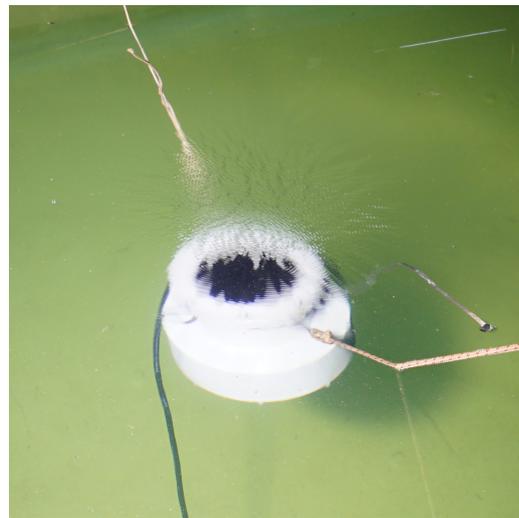
La texture générée par illumination des particules naturellement en surface présentant un certain nombre d'inconvénients, nous avons essayé d'exciter la surface de l'eau avec des ondes acoustiques sous-marines.

Avec l'aide de nos collègues acousticiens, nous avons placé une source basse fréquence sous la surface de l'eau. Le haut parleur sous-marin utilisé a pour fréquence de résonance 75Hz. Les signaux préparés pour ce test étaient de simples sinus de fréquence 50, 75, 100, 200, 400 et 500 Hz.

Nous avons commencé les émissions de signaux, avec la source placée à 2m de profondeur et aucun changement n'était visible en surface. Il a fallu remonter la source jusqu'à être à 30cm sous la surface de l'eau, en figures 5.1a et 5.1b, pour voir apparaître des ondes de surface avec les signaux de 50, 75 et 100 Hz. Les autres signaux n'ont créé aucune onde de surface.



(A) Haut parleur sous-marin, émission d'un signal de 200Hz



(B) Haut parleur sous-marin, émission d'un signal de 50Hz

FIGURE 5.1 – Haut parleur sous-marin, placé 30cm sous la surface de l'eau

Pour analyser les images, nous avons réalisé des FFT selon l'axe du temps pour chacun des pixels sur une série de 1000 images échantillonnées à 750Hz et sur un test avec le haut-parleur émettant à $f_e=50\text{Hz}$. On obtient ainsi une matrice 3D des valeurs des FFT avec un axe de fréquence, un axe de ligne de pixels et un axe de colonne de pixels. En moyennant les valeurs des modules des FFT sur l'ensemble des pixels pour chaque fréquence (sur les axes des colonnes et des lignes de pixels), on obtient la figure 5.2. On y voit un signal harmonique très marqué avec un fondamental à $f_e/2$. Cela indique la présence d'une instabilité de Faraday.

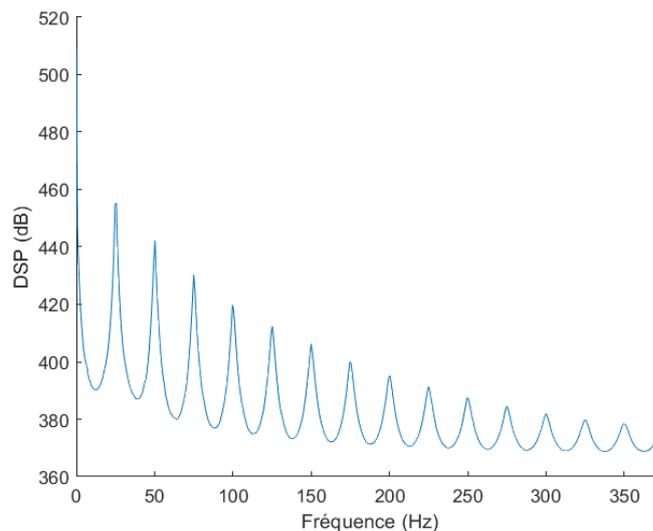
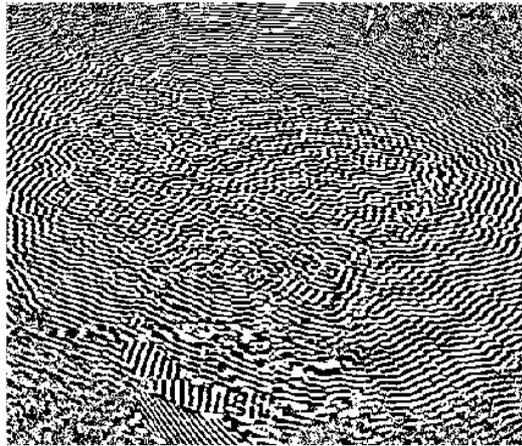
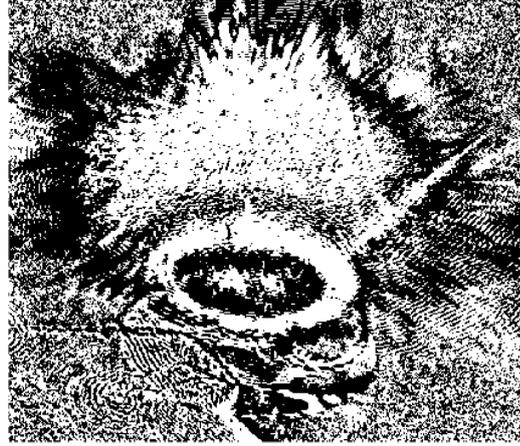


FIGURE 5.2 – FFT temporelle sur 1000 images, moyenné par indice de fréquence

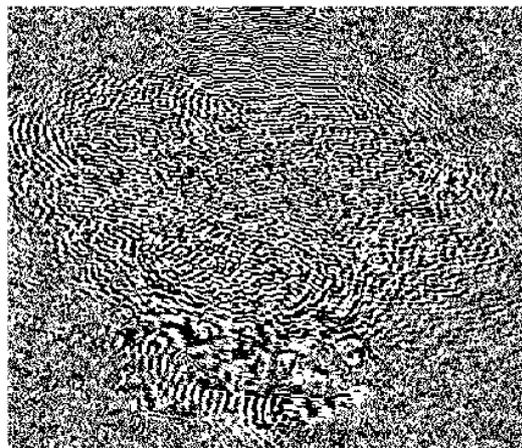
En affichant les modes du fondamental et de ses harmoniques (25, 50, 75 et 100Hz), c'est à dire la partie réelle du signal de la FFT, on obtient la figure 5.3. On voit bien un motif sur les fréquences à $f_e/2$ et $3f_e/2$ sur les figures 5.3a et 5.3c. Sur les figures 5.3b et 5.3d, on voit que la vibration du haut-parleur prend le dessus et que le motif semble être instable. Ces premiers essais de vibrations sont partiellement satisfaisants car la profondeur du haut-parleur est uniquement 30cm sous la surface. On aimerait pouvoir positionner la source bien plus bas afin de ne pas perturber les vagues. Il faudra travailler sur la forme du signal d'émission afin de générer une instabilité en plaçant le haut-parleur à une plus grande profondeur. La modulation en amplitude d'un signal de plus haute fréquence pourrait être une solution à explorer pour ce problème.



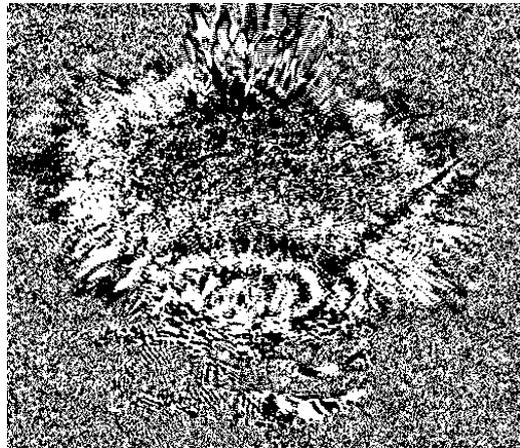
(A) Mode 25 Hz.



(B) Mode 50 Hz.



(C) Mode 75 Hz.



(D) Mode 100 Hz.

FIGURE 5.3 – Partie réel de l'image à différentes fréquences

6 Conclusion

Ce premier travail sur la mesure stéréo-vidéo a permis d'éclaircir de nombreux points, tant sur le principe théorique que la mise en œuvre expérimentale.

- Il se trouve que peu de bassin d'essais utilise actuellement la stéréo-vidéo pour mesurer des champs de vagues et chaque méthode utilisée à différents inconvénients qui ne nous permettent pas de les employer au bassin de génie océanique de l'Ifremer centre Brest. Il y a cependant beaucoup de travaux récents chez les océanographes qui mettent ce type de mesure en place en extérieur.
- Le principe de la mesure par stéréo-vidéo est maintenant compris dans son ensemble ainsi que la chaîne de traitement d'image (WASS) qui a été ici utilisée. Bien que faite à l'origine pour un environnement différent, le fait que la chaîne soit open source pourrait permettre de la modifier pour les bassins d'essais. On pourrait imaginer que la dernière étape de la chaîne qui recherche un plan soit uniquement faite sur les images en statique et que la partie 4.1.1 : « Vers le repère de la caméra de gauche », fasse partie intégrante de la chaîne.
- Bien que le principe de mesure de la stéréo-vidéo et sa modélisation par les paramètres intrinsèques et extrinsèques aient été bien compris, il reste du travail sur la partie étalonnage pour comprendre pourquoi il n'y a pas eu de soucis durant les tests-préliminaires mais que l'on ait eu des résultats adhérents durant l'étalonnage sur le bassin.
- Il ne serait pas rigoureux d'estimer une incertitude sur la mesure stéréo vidéo sur cette campagne car il y a trop d'approximation pour la comparer à la mesure de référence, (le positionnement exact des sondes et les vagues ayant la même hauteur sur la largeur du bassin). Cependant on voit tout de même que l'erreur est généralement de l'ordre de $\pm 5\text{mm}$, avec un filtre médian de 5×5 et avec les objectifs de 35mm.
- Le passage à l'objectif de 20mm nous montre bien que la résolution du motif sur la surface à mesurer n'est pas à négliger. Il faudra déterminer quel est le meilleur rapport entre la taille d'un pixel projeté sur la zone mesurée et la taille des motifs sur cette zone. La génération de texture par acoustique sous-marine devrait pouvoir répondre à ce problème s'il est mené au bout car les longueurs d'onde des instabilités en surface dépendra de l'onde acoustique émise. Il va maintenant falloir étudier théoriquement et expérimentalement les instabilités de Faraday afin de savoir s'il est possible de générer ces instabilités avec des sources acoustiques plus profonde.

Ce projet de fin d'étude a été très intéressant et instructif, de par son côté théorique, expérimental et analyse, qui le rend très complet. J'espère que ce premier pas dans la stéréo-vidéo permettra de continuer à développer ce type de mesure et qu'à l'avenir, on puisse mesurer un état de surface d'eau en interaction avec une structure. Ayant beaucoup travaillé ces trois dernières années sur différentes techniques de mesures de houle, en un certain point (1D), avec des sondes captatives et asservies, cette nouvelle technique de mesures de champs (3D) est une belle façon de conclure ces trois ans d'apprentissage. Ce travail aurait été difficile à imaginer sans les cours suivis en parallèle à l'ENSTA Bretagne qui m'ont permis d'être beaucoup plus à l'aise tant sur partie théorique que la partie analyse de données.

A Images d'étalonnage des tests préliminaires



FIGURE A.1 – Images d'étalonnage des tests préliminaires de la caméra de gauche sur l'hexapode

B Reconstruction du plan de l'hexapode suivant différentes inclinaisons du plateau

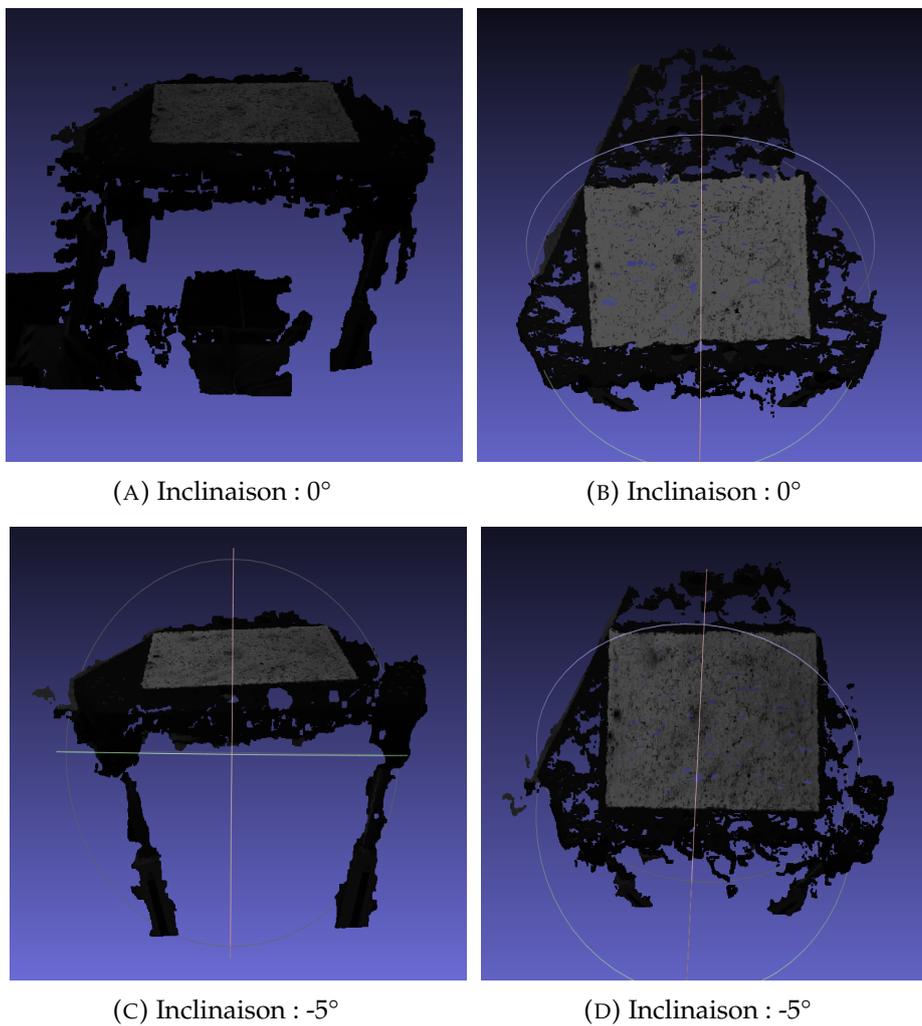
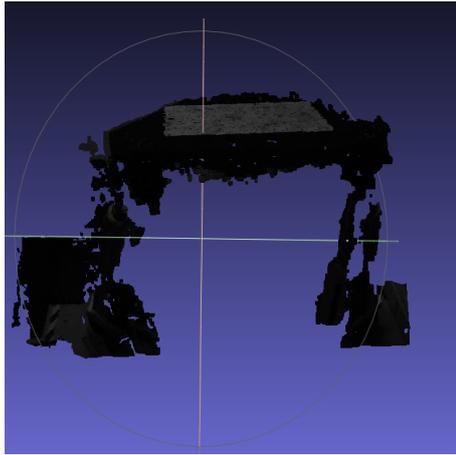
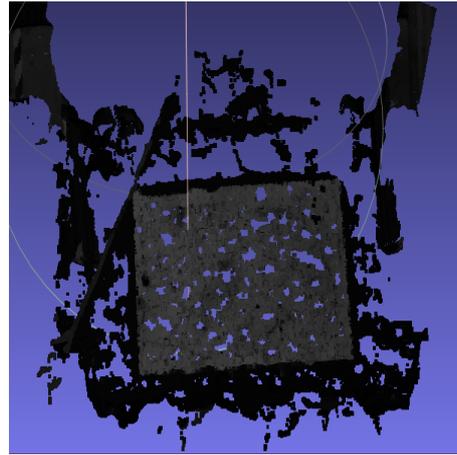


FIGURE B.1 – Gauche : Hexapode vu des caméras. Droite : Hexapode vu orthogonal au plateau



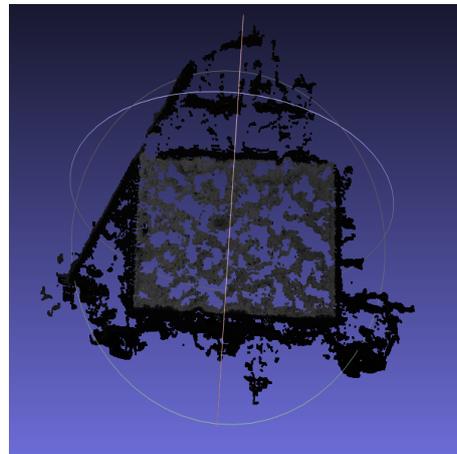
(E) Inclinaison : -10°



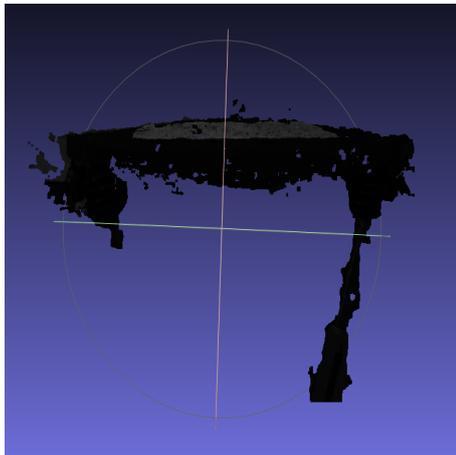
(F) Inclinaison : -10°



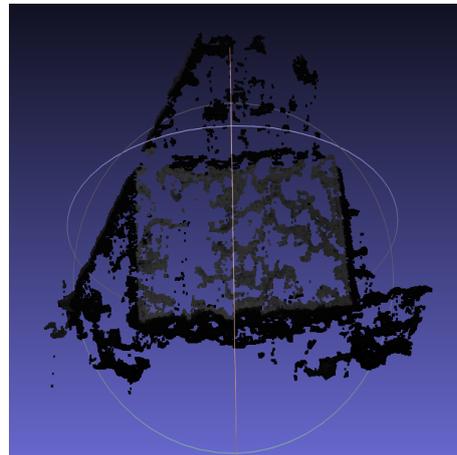
(G) Inclinaison : -15°



(H) Inclinaison : -15°



(I) Inclinaison : -20°



(J) Inclinaison : -20°

FIGURE B.1 – Gauche : Hexapode vu des caméras. Droite : Hexapode vu orthogonal au plateau (cont.)

C Sonde à houle asservie

Pour mesurer la houle, il existe plusieurs catégories de capteurs. Les capteurs les plus courants sont intrusif, c'est-à-dire qu'une partie du capteur est dans l'eau ce qui peut poser des problèmes à la fois de déformation de la vague et d'incertitude de mesure dû à une pellicule d'eau s'accumulant sur la partie face à la houle. La sonde asservie est peu intrusive (elle ne perturbe pas la houle car une pointe de seulement 1 mm de diamètre est enfoncée de 0.5 à 1 mm dans l'eau) et a une incertitude de mesures élargie à $k=2$, extrêmement faible 0.33mm en statique (voir STATIC CALIBRATION REPORT). Le principe de la sonde est d'asservir une tige à suivre la surface de l'eau. La position de la tige renseigne ainsi sur la hauteur de l'eau.



FIGURE C.1 – Sonde à houle asservie en fonctionnement

L'asservissement est réalisé par une mesure de l'enfoncement dans l'eau d'une électrode de platine. L'électrode de platine est soumise à une différence de potentiel. L'intensité du courant traversant la pointe de platine renseigne sur l'enfoncement de cette dernière dans l'eau.

L'électrode de platine est fixée sur un palpeur en carbone, lui-même fixé sur un chariot. Le chariot est relié à un moteur électrique par l'intermédiaire d'une courroie crantée, et est guidé en translation verticale par le biais d'une glissière Figure : C.2.

La mesure de résistance entre la pointe de platine et l'eau est transmise aux cartes électroniques par le biais d'un contact glissant. La valeur de la résistance renseigne sur l'enfoncement de la pointe de platine dans l'eau. Le

moteur est alors piloté pour faire monter ou descendre la tige, de sorte que la pointe de platine soit toujours enfoncée de 1 mm environ (l'enfoncement nominal peut être choisi). La mesure de la position du palpeur est ensuite relevée par l'intermédiaire d'un capteur magnétostrictif. C'est cette mesure qui renseigne la hauteur de l'eau. La sonde possède deux capteurs de fin de course qui permettent d'arrêter le déplacement de la tige lorsque la hauteur d'eau n'est plus dans la plage de mesure de la sonde. Le principe de l'asservissement est décrit ci-dessous par la Figure : C.3.

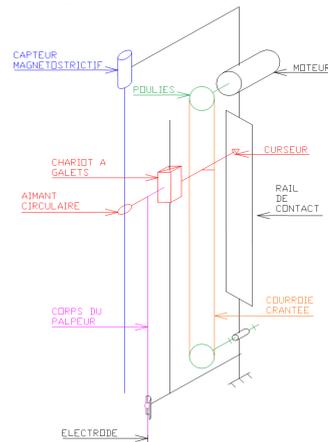


FIGURE C.2 – Schéma cinématique de la sonde

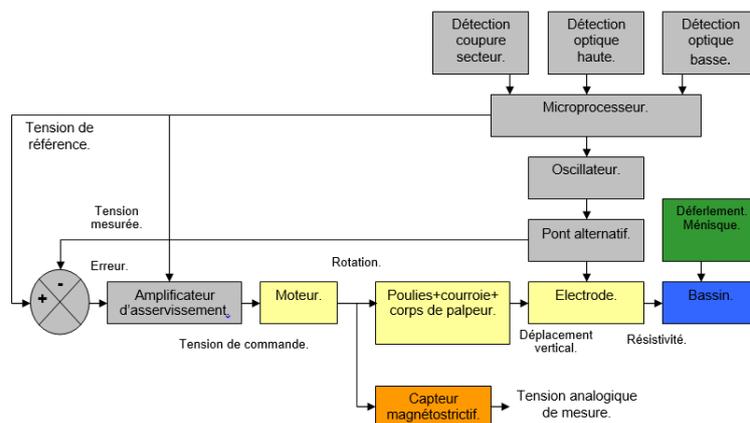
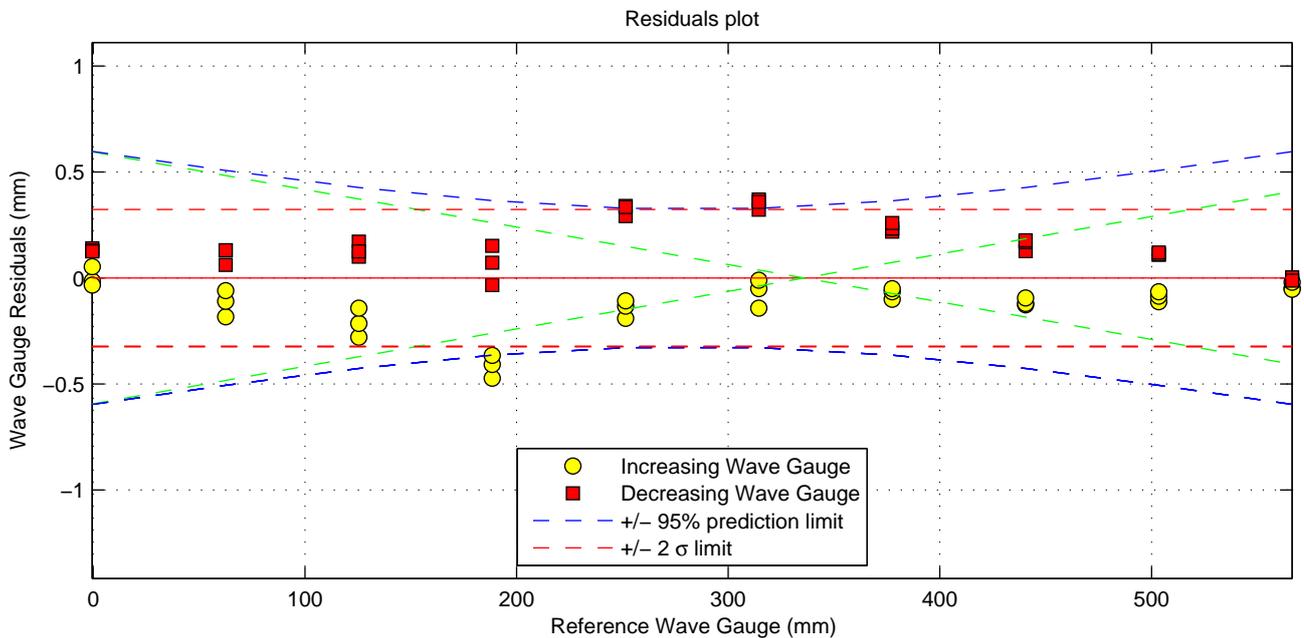
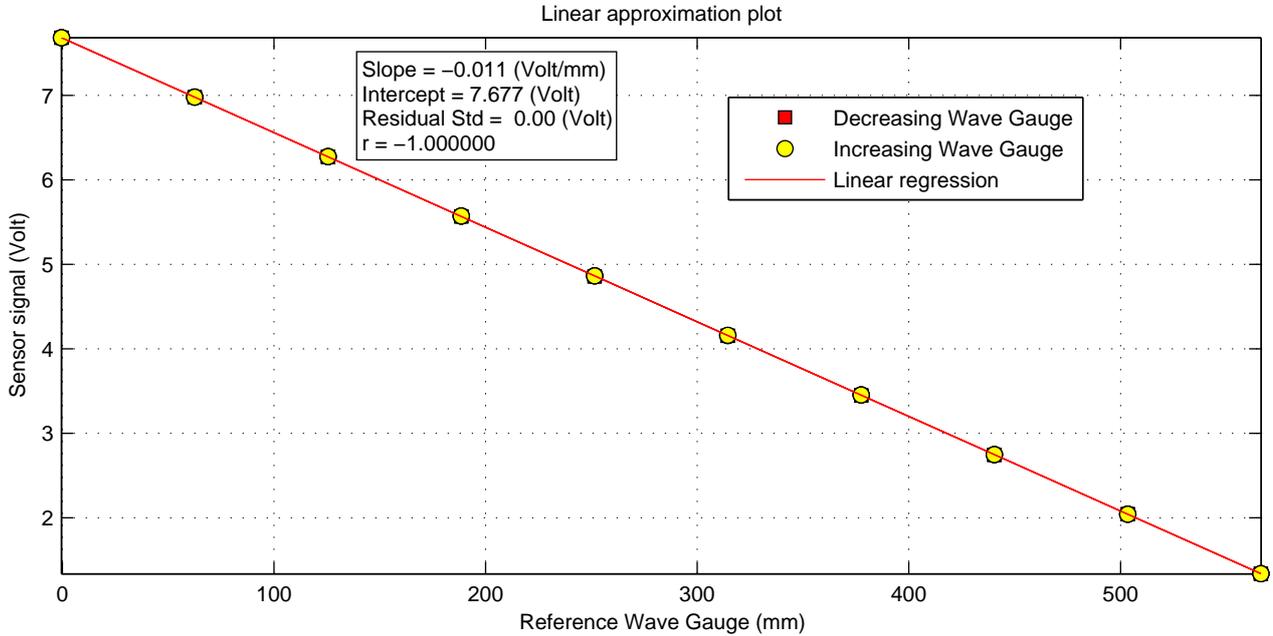


FIGURE C.3 – Schéma d'asservissement de la sonde

STATIC CALIBRATION REPORT

| | |
|-------------------------------------|---|
| Sensor name: Sonde 1 | Calibration reference standard: GYMTC 21647C-9Z12 (certif oct 2014) |
| Type: Wave Gauge | Acquisition device: NI 6225 - ref: I042 |
| Manufacturer: Ifremer-QuasarConcept | Ampli: --- |
| Model: Servo gauge | 10 points (3 sec @100Hz) |
| Serial number: sn 1 | 3 cycles(advance & return) |
| Ifremer number: D044 | |
| Full Range:700 mm | |



| | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| Sensitivity = -89.327 (mm/Volt) | Residual Std = -0.162 mm |
| Linearity = 0.07 (%FS) | Coverage factor = 2 |
| Hysteresis = 0.08 (%FS) | Expanded uncertainty = -0.32 mm |
| Repeatability = 0.09 (%FS) | |
| Noise = 0.07 (%FS) | |

Calibration by J. Ohana - Ifremer RDT/CSM - 19-Apr-2017

Reference documents:
 [1] ITTC (2002) Procedures and Guidelines - 7.6-02-09 - Calibration of load cells.
 [2] ITTC (2008) Procedures and Guidelines - 7.5-01-03-01 - Uncertainty analysis.



Bibliographie

- Basics of Computational Stereo Vision* (s. d.). URL : <https://www.cs.auckland.ac.nz/courses/compsci773s1c/lectures/773-GG/topCS773.htm>.
- BERGAMASCO, Filippo et al. (2016). « Multi-view horizon-driven sea plane estimation for stereo wave imaging on moving vessels ». In : *Computers & Geosciences* 95, p. 105-117. ISSN : 0098-3004. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.012>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300416301911>.
- BERGAMASCO, Filippo et al. (2017). « WASS : An open-source pipeline for 3D stereo reconstruction of ocean waves ». In : *Computers & Geosciences* 107, p. 28 -36. ISSN : 0098-3004. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.001>.
- BOUGUET, Jean-Yves (2015). *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. URL : http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html#parameters.
- CAPLIER, Clément et al. (oct. 2016). « Energy distribution in shallow water ship wakes from a spectral analysis of the wave field ». In : *Physics of Fluids* 28.107104. URL : <https://doi.org/10.1063/1.4964923>.
- CHATELLIER, Ludovic et al. (fév. 2013). « A parametric PIV/DIC method for the measurement of free surface flows ». In : *Experiments in Fluids* 54.1488. URL : <https://doi.org/10.1007/s00348-013-1488-4>.
- COBELLI, Pablo Javier et al. (jan. 2009). « Global measurement of water waves by Fourier transform profilometry ». In : *Experiments in Fluids* 46.1037. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/s00348-009-0611-z>.
- cv : :stereo : :StereoBinarySGBM Class Reference (2021). URL : https://docs.opencv.org/3.4/d1/d9f/classcv_1_1stereo_1_1StereoBinarySGBM.html#details.
- GOMIT, Guillaume et al. (déc. 2014). « Spectral analysis of ship waves in deep water from accurate measurements of the free surface elevation by optical methods ». In : *Physics of Fluids* 26.122101. URL : <https://doi.org/10.1063/1.4902415>.
- GOMIT, Guillaume et al. (sept. 2015). « Large-scale free surface measurement for the analysis of ship waves in a towing tank ». In : *Experiments in Fluids* 56.184. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/s00348-015-2054-z>.
- HARTLEY, Richard I. et Peter STURM (1997). « Triangulation ». In : *Computer Vision and Image Understanding* 68.2, p. 146-157. ISSN : 1077-3142. DOI : <https://doi.org/10.1006/cviu.1997.0547>.
- HEIKKILA, J. et O. SILVEN (1997). « A four-step camera calibration procedure with implicit image correction ». In : p. 1106-1112. DOI : 10.1109/CVPR.

- 1997.609468. URL : http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/papers/heikkila97.pdf.
- HIRSCHMÜLLER, Heiko (juin 2003). « Stereo Vision Based Mapping and Immediate Virtual Walkthroughs ». Thèse de doct. School of Computing De Montfort University. URL : <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.273708>.
- HIRSCHMULLER, Heiko (2008). « Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 30.2, p. 328-341. DOI : 10.1109/TPAMI.2007.1166.
- LECKLER, Fabien (déc. 2013). « Observation and modelisation of wave breaking ». Theses. Université de Bretagne occidentale - Brest. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01622848>.
- MEERKERK, Mike, C POELMA et J WESTERWEEL (jan. 2020). « Scanning stereo PLIF method for free surface measurements in large 3D domains ». In : *Experiments in Fluids* 61.19. URL : <https://doi.org/10.1007/s00348-019-2846-7>.
- MOISY, Frederic (sept. 2010). « Instabilités, ondes, et turbulence en rotation ». HRD. Université Paris Sud. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00519073v2>.
- TSUBAKI, Ryota et Ichiro FUJITA (août 2005). « Stereoscopic measurement of a fluctuating free surface with discontinuities ». In : *Measurement Science and Technology* 16.10, p. 1894-1902. URL : <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/10/003>.
- TURNNEY, Damon E, Angelika ANDERER et Sanjoy BANERJEE (mars 2009). « A method for three-dimensional interfacial particle image velocimetry (3D-IPIV) of an air-water interface ». In : *Measurement Science and Technology* 20.4, p. 045403. URL : <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/4/045403>.
- ZHANG, Xin et Charles COX (juill. 1994). « Measuring the two-dimensional structure of a wavy water surface optically : A surface gradient detector ». In : *Experiments in Fluids* 17.4, p. 225-237. URL : <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF00203041.pdf>.

