



## DEVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF DE MESURE DE CHAMP DE VAGUES STATIONNAIRE EN BASSIN DES CARENES PAR TECHNIQUE DE STEREOVISION

Guillaume Gomit<sup>a,\*</sup>, Damien Calluau<sup>a</sup>, Ludovic Chatellier<sup>a</sup>, Laurent David<sup>a</sup>, Didier Fréchet<sup>b</sup>,  
Romuald Boucheron<sup>b</sup>, Olivier Perelman<sup>b</sup>, Christian Hubert<sup>c</sup>

(a) Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, 86000, Poitiers, France

(b) DGA techniques hydrodynamiques, 27100, Val de Reuil, France

(c) ERROL, 94100, Saint Maur des Fossés, France

\*Correspondant: guillaume.gomit@univ-poitiers.fr

**Résumé :** Une méthode de mesure de surface libre pour l'analyse de champs de vagues stationnaire en bassin des carènes est présentée. Cette méthode s'appuie sur l'utilisation d'un système stéréoscopique enregistrant des images de la projection d'un faisceau laser sur la surface. La détection de ce faisceau sur les caméras formant le système stéréoscopique permet par triangulation de reconstruire la forme de la surface. Ce dispositif est appliqué à la mesure du champ de vague stationnaire autour d'un modèle de navire dans le bassin des carènes B600 de la DGA (Direction générale de l'armement). Les résultats obtenus avec cette méthode sont comparés avec des mesures de surface linéiques obtenues dans les mêmes conditions pour évaluer leur précision. Ces résultats sont également comparés avec des mesures réalisées autour d'une maquette de plus petite dimension pour évaluer les effets d'échelles.

### 1 Introduction

Les mesures des ondes générées par des modèles de navire en bassin des carènes sont généralement réalisées à partir de capteurs ponctuels type sondes résistives, houlomètres lasers ou sondes acoustiques (Kim *et al.* [2001]) ou à partir de méthode linéique en s'appuyant sur une ligne laser (Perleman *et al.* [2011]). Ces techniques ponctuelles ou linéiques restent toutefois limitées pour l'identification d'un sillage dans son ensemble et des méthodes globales de mesure de surface doivent être développées.

En bassin des carènes de petites dimensions (<100 mètres) des méthodes de mesures optiques surfaciques peuvent être utilisées (Gomit *et al.* [2013], Chatellier *et al.* [2013]). Ces méthodes s'appuient sur des corrélations d'images issues de systèmes stéréoscopiques et sur la présence de particules sur la surface ou au sein du fluide. En bassin des carènes de grandes tailles, notamment dans celui de la Direction Générale de l'Armement (B600), l'impossibilité d'utiliser des particules et les contraintes liées aux grandes dimensions des champs à mesurer (plusieurs mètres carrés) nécessite le développement de méthodes de mesure adaptées. Ces techniques doivent permettre la détermination de la hauteur de la surface du fluide de façon précise sur un champ de vision étendu.

Dans ce papier, un dispositif de mesure basé sur la projection de faisceaux laser sur la surface du fluide vu par un système stéréoscopique calibré est proposé. Le principe de la méthode est de détecter l'impact des faisceaux laser sur l'interface air/eau afin de déterminer la hauteur de la surface par triangulation en un nombre de positions données. Ce

dispositif est appliqué à la mesure du champ de vagues stationnaires autour d'une maquette de navire à l'échelle 1/10<sup>ème</sup>. Les résultats sont comparés à des mesures de hauteurs obtenues par une méthode de mesure linéique dans les mêmes conditions. Enfin, les résultats à grande échelle sont comparés à des mesures réalisées dans un bassin des carènes de petite dimension autour de la même maquette à l'échelle 1/77,5.

### 2 Méthode de mesure

La technique de mesure développée dans ce papier s'appuie sur la projection de faisceaux laser sur la surface du fluide. La détection de l'impact de ces faisceaux sur l'interface air/eau par un système stéréoscopique permet de déterminer la hauteur de la surface par triangulation en un nombre de positions données.

#### 2.1 Projection de faisceau Laser dans l'eau

Les caractéristiques des images de la projection d'un faisceau laser sur une surface fluide acquises par un système de stéréovision ont été analysées à partir d'essais. Ces propriétés dépendent de la forme de la surface, de l'atténuation et de la diffusion de la lumière dans le fluide, de la puissance du laser et de l'orientation du faisceau et des caméras par rapport à la surface. Ces tests ont permis de mettre en évidence que cette détection est compromise dans le cas d'une eau trop claire mais possible dans le cas d'une eau trouble comme celle présente au sein du bassin des carènes de la DGA.

La Figure 1 présente l'exemple du motif enregistré par une caméra lors la projection d'un faisceau laser sur une surface au repos. Ici, un zoom a été effectué sur la partie de l'image comprenant le motif. Cette

image est caractérisée par une trace rectiligne du faisceau laser depuis son entrée dans le fluide (point avec une intensité plus élevée, côté gauche de l'image). L'intensité de ce motif s'atténue ensuite avec la pénétration dans le fluide. On note que pour des pentes faibles de la surface, les caractéristiques du motif sont identiques.



Figure 1 Image de la projection d'un faisceau laser sur une surface au repos

Dans le cas où les variations de surface sont plus importantes, ce motif n'est plus rectiligne mais présente des courbures (Figure 2.a). Ceci s'explique par la réfraction de la lumière au travers de l'interface déformée proche du point d'entrée dans l'eau du faisceau. Sur la Figure 2.b, le motif est divisé en deux parties. Ce phénomène, également dû à la réfraction de la lumière, traduit des courbures de la surface encore plus importantes proches du point de projection. Enfin, un troisième type d'image (Figure 2.c) a été enregistré dans le cas où la surface présente des fortes déformations (surface turbulente, vague déferlante). Ces images sont caractérisées par un point de forte intensité marquant l'impact du laser sur la surface.

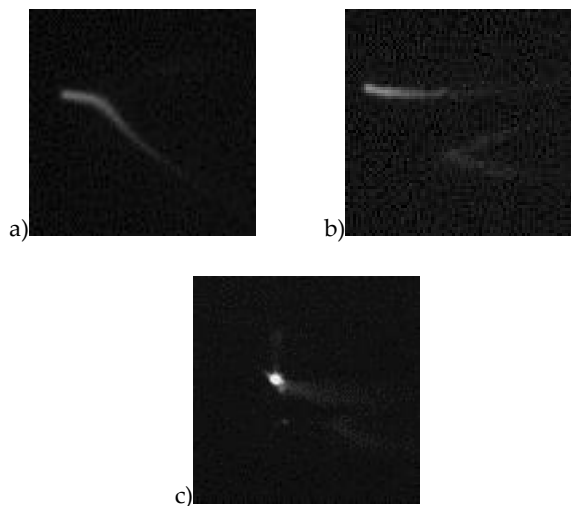


Figure 2 Image de la projection d'un faisceau laser : a) et b) Surfaces déformées c) Surfaces déferlantes

Le principe de la méthode est de détecter l'intersection entre le faisceau laser et l'interface sur chaque image d'un système stéréoscopique calibré. Connaissant les coordonnées images de ce point sur chaque caméra, sa position dans le repère de mesure peut être déterminée par triangulation.

Lors des essais, pour mesurer la surface libre autour du modèle de navire, une grille de ( $N_x \times N_y$ ) points

est générée à partir d'un laser permettant de balayer la surface à caractériser. Pour chaque position du faisceau laser, une image est enregistrée sur chaque caméra du système stéréoscopique. Pour mesurer l'ensemble de la surface,  $N_x \times N_y$  images sont donc nécessaires. Cette méthode permet donc de mesurer uniquement des surfaces stationnaires. Dans un cas instationnaire, la projection au même instant d'une grille de points pourrait être envisagée.

## 2.2 Traitement d'image

En raison des différences de caractéristiques des images du faisceau en fonction de l'état de surface, un traitement adaptatif des images doit être mis en place.

Sur l'ensemble de ces images, même dans le cas où la surface est déformée (Figure 2.a et 2.b), la partie de faisceau proche de la surface peut être assimilée à une droite. En localisant cette partie du motif sur les images, le point d'entrée du faisceau laser dans le fluide peut être estimé. Un algorithme de traitement d'images basé sur des méthodes de détection de forme a donc été développé. Ici, cette détection est réalisée à partir d'un algorithme de suivi de contours basé sur la méthode de Freeman. Cet algorithme est résumé ci-dessous et est illustré à partir d'une image de projection sur une surface au repos (Figure 3) correspondant à la Figure 1.

L'algorithme de traitement d'image peut être résumé comme suit :

1. Les images de la surface (Figure 3.a) sont seuillées pour éliminer le bruit de fond, puis binarisées afin de ne garder que les pixels définissant la trace de faisceau laser dans l'eau (Figure 3.b)
2. A partir de cette image binarisée, le contour est extrait à l'aide d'une méthode de Freeman (Figure 3.c)
3. L'axe du motif est ensuite recherché. Ici, cette droite est estimée à partir de la recherche des points du contour les plus éloignés entre eux (Figure 3.d).
4. L'intensité sur la droite définissant le contour est extraite. Nous faisons ensuite l'hypothèse que le point d'entrée du faisceau laser correspond au premier saut d'intensité sur cette droite. Pour le déterminer, la dérivée d'intensité est déterminée et le maximum de cette courbe est estimé.

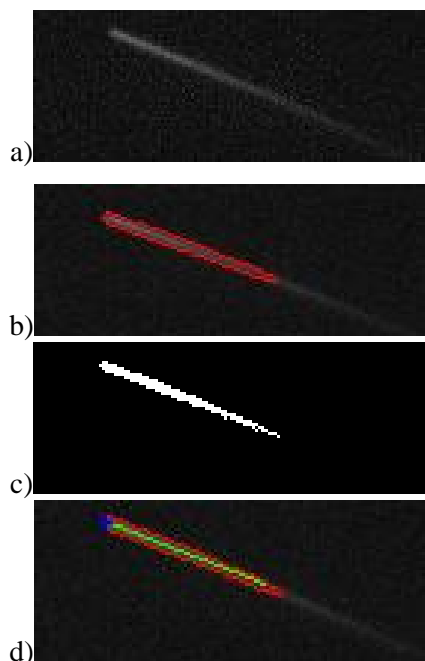


Figure 3 Différentes étapes de détection de l'impact du faisceau laser sur la surface : a) Portion de l'image, issue de l'acquisition, correspondant à la trace du faisceau laser dans l'eau b) Détection du contour du motif (contour rouge) c) Binarisation de l'image d) Recherche de la droite de ce motif (ligne verte) et détection du point d'entrée (point bleu).

Dans les cas où le motif présente des fortes courbures, le même algorithme est appliqué aux images. Dans ce cas, la valeur du seuil doit être choisie pour n'extraire que la partie rectiligne du motif. Lorsque le faisceau est projeté sur une surface déferlante, le point d'impact est défini par une zone de forte intensité (Figure 2.c). Dans ce cas, le motif ne présente pas les mêmes caractéristiques et l'algorithme précédent ne permet pas d'extraire le point d'entrée. Ici, la zone de forte intensité peut être extraite en utilisant les étapes 1 et 2 de l'algorithme précédent. Ensuite, nous faisons l'hypothèse que le point d'impact du faisceau sur la surface correspond au barycentre du motif enregistré sur les images lorsque la surface est déferlante.

### 3 Application en bassin des carènes : B600

#### 3.1 Dispositif expérimental

La méthode proposée dans la partie précédente a été appliquée au sein du bassin B600 de la DGA. Ce bassin mesure 545 mètres de long pour une largeur de 15 mètres et une profondeur de 7 mètres. La plateforme de traction permet de tracter des modèles de bateaux de grandes échelles, jusqu'à 10 mètres de long, à une vitesse maximale de 12 m/s. Une plage d'amortissement est également présente en bout du bassin afin de limiter les réflexions des ondes longitudinales. Un temps de repos d'environ 45 minutes doit toutefois être respecté afin d'obtenir une

surface au repos entre deux essais. La maquette de bateau utilisé est le modèle d'un navire de recherche maritime à l'échelle 1/10<sup>ème</sup> (Figure 4). Sa longueur est de 8,2 m pour un maître bau de 1,5 m et un tirant d'eau de 0.5 m.

#### 3.1.1 Systèmes stéréoscopiques

Pour cette mesure, deux systèmes stéréoscopiques ont été utilisés pour acquérir des images de la projection du faisceau laser sur la surface. L'ensemble du dispositif est fixé sur la plateforme de traction du bassin pour permettre la mesure du champ de vagues généré sur le côté du modèle (Figure 4).

Le premier système, noté Caméra #1.i sur la figure 4, permet d'acquérir des images de la zone avant du navire. Il est composé de deux caméras *Point Grey Flea 3* (2080 × 1552 pixels). Ces caméras sont équipées de lentilles à focale fixe de 14 mm. Le champ de vision commun à ces deux caméras est d'environ 2 × 2 m<sup>2</sup> localisé au niveau de l'étrave du modèle (Figure 5). Ces caméras forment un angle entre leurs axes optiques d'environ 45°. L'angle avec la normale à la surface est également de 45°.

Le second système, noté Caméra #2.i, est composé de deux caméras *EOSENSE* (1280 × 1024 pixels) munies de focales de 16 mm. Les caméras de ce système sont plus éloignées que les précédentes et permettent d'obtenir un champ de vision commun de 5 × 8 m<sup>2</sup> correspondant à la totalité de la longueur du modèle (Figure 5). L'angle entre les deux axes optiques est de 60° et l'angle avec la normale à la surface est de 60°.

Ce champ contient le champ de vision des deux premières caméras.

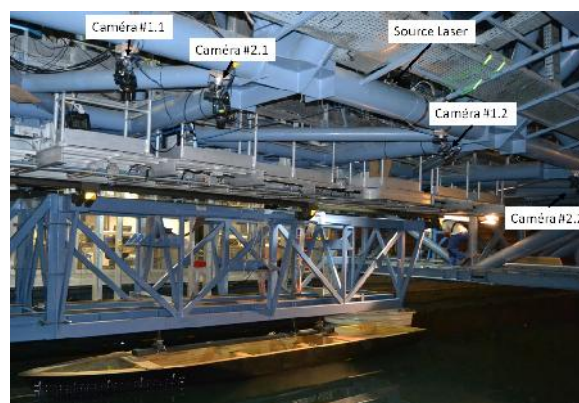


Figure 4 Systèmes stéréoscopiques

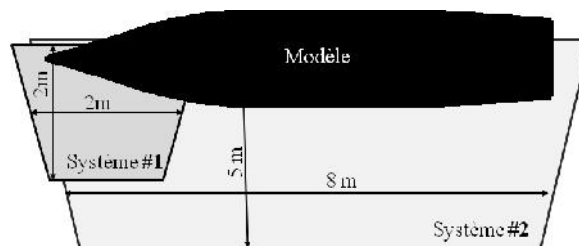


Figure 5 Représentation des champs de vision des deux systèmes stéréoscopiques

Le choix du champ de prise de vue des caméras a été optimisé en fonction des optiques et de la résolution des capteurs CCD des caméras. Typiquement on a cherché à ce que l'image du faisceau laser soit définie par une forme de l'ordre de 10 pixels sur les images de la caméra.

### 3.1.2 Dispositif laser

Le dispositif laser, fourni par la société *ERROL*, permet de générer une matrice de points à projeter sur la surface. Ce dispositif de balayage est constitué d'un coffret de tête de balayage et d'une source Laser déportée d'une puissance maximale de 1 W. Il comprend un laser de faible divergence (0.5 mrad), soit un spot de  $\varnothing 3$  mm à la perpendiculaire de la projection et de  $\varnothing 4.5$  mm à l'extrémité de la projection.

La figure 6.a représente la grille de balayage du faisceau laser, avant correction d'anamorphose, projeté sur une surface en bord de bassin parallèle à la surface du plan d'eau. Une anamorphose est appliquée pour rétablir un balayage régulier à la surface du plan d'eau selon les axes du bassin (Figure 6.b).

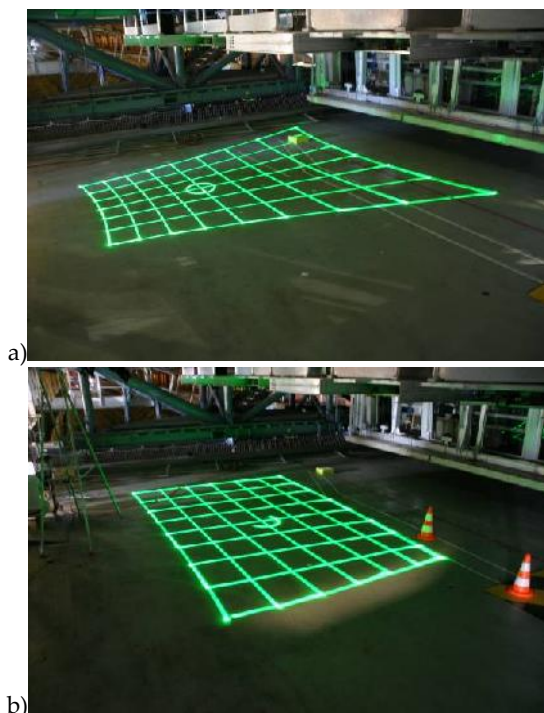


Figure 6 Balayage du faisceau à incrément angulaire régulier, Balayage du faisceau avec correction d'anamorphose

Le système de balayage du faisceau Laser est disposé du même côté que les caméras pour éviter toute réflexion directe du faisceau sur les caméras. Le pilotage du balayage Laser a été paramétré pour que le balayage angulaire incrémental du faisceau réalise un balayage régulier de la surface du plan d'eau.

Les points sur la surface de l'eau sont projetés de manière séquentielle à une fréquence de 25 Hz. Durant les essais, une matrice de  $53 \times 40$  points a été projetée. Une durée de 85 secondes est donc nécessaire pour générer l'ensemble des points.

Pour chaque point projeté, une image de la surface est enregistrée par les quatre caméras. Une synchronisation de la prise d'image avec le balayage du faisceau est donc nécessaire. Cette synchronisation est opérée à partir du signal de pilotage du déplacement du faisceau Laser et est réalisé à l'aide d'un boîtier BNC (Model 588 Digital Delay / Pulse Generator). Un signal TTL fourni par le laser permet de lancer et d'ajuster l'acquisition des caméras. Le départ de l'acquisition est donné quand la maquette atteint une vitesse d'avancée constante afin d'obtenir un champ de vagues stationnaire autour du modèle. On note que pour la vitesse d'avancée du navire la plus faible, deux acquisitions complètes de la matrice peuvent être réalisées sur la longueur du bassin.

La figure 7 présente une photographie de la projection d'une partie de la matrice de point sur la surface de l'eau autour de la maquette. Sur cette image, plusieurs faisceaux sont visibles en raison du temps de pause important utilisé pour visualiser la matrice générée sur une même photographie.

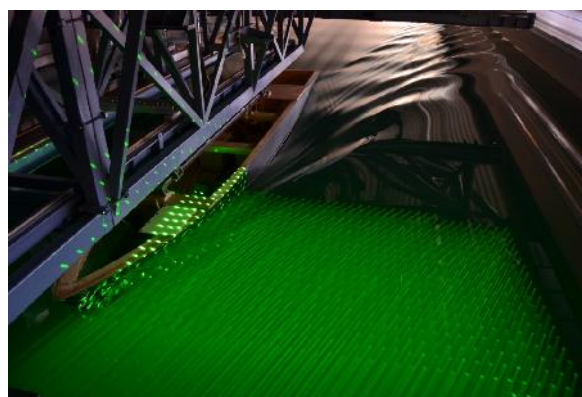


Figure 7 Photographie d'une partie de la grille de points projetés sur le côté de la maquette

### 3.2 Calibration du système stéréoscopique

La calibration du système stéréoscopique est une étape cruciale pour la détermination de la surface tridimensionnelle. Cette étape assure la précision de la méthode de reconstruction par triangulation.

Dans la plupart des applications, cette étape de calibration est réalisée en translatant une mire de points à des positions connues. A partir de l'ensemble de ces points tridimensionnels et de leurs projections sur les images, les paramètres du modèle de calibration des caméras peuvent être déterminés. Cependant lors de telles calibrations, l'ensemble du volume de mesure doit être calibré pour limiter les erreurs. Ici, le champ de vision étant important ( $5 \times 8$

m<sup>2</sup>), ce type de calibration est donc difficile à mettre en place et une autre méthode a été utilisée. Cette méthode, proposée par Zhang [2002], permet de réaliser une calibration avec une mire de taille raisonnable.

Cette calibration consiste à enregistrer des images d'une mire plane sous différentes positions et orientations. Cette étape permet de calculer les paramètres internes à la caméra ainsi que la matrice rotation et le vecteur translation associés à chaque vue. Une seconde étape permet de se replacer dans le repère lié au bateau et non dans un repère lié à une position de mire inconnue. Pour cela, l'image d'une mire à une position connue est enregistrée.

Pour réaliser la première étape, une mire comportant deux faces planes d'inclinaisons différentes a été utilisée (Figure 8). Cette mire a été déplacée dans le champ de vision des quatre caméras en lui faisant subir des translations et des rotations afin d'obtenir plusieurs positions et orientations de la mire dans la zone de mesures.

Une mire de petite dimension a ensuite été placée à l'avant du bateau et une acquisition d'images d'une mire plane flottante sur la surface a été réalisée afin d'obtenir un plan de référence. La position de la petite mire est connue avec précision par rapport au modèle et permet de définir un repère de mesure lié au navire.

Ici, les erreurs de projection estimées à partir d'un modèle de distorsions sur l'ensemble des caméras sont de l'ordre de 0,01 pixel. Cependant, il est à noter que l'ensemble du repère image n'a pas été calibré pour les deux caméras du système stéréoscopique le plus éloigné.

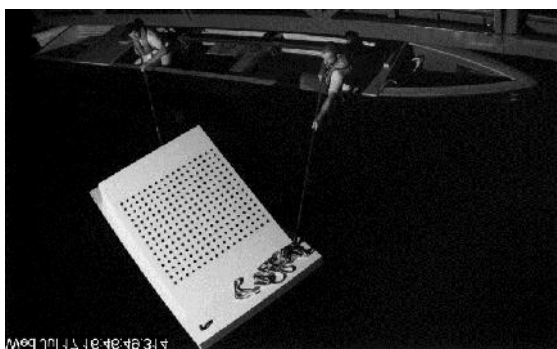


Figure 8 Image de calibration enregistrée par une caméra du système stéréoscopique #2

## 4 Resultats

### 4.1 Mesure du plan d'eau au repos

La plate-forme soutenant à la fois la maquette et les systèmes stéréoscopiques peut être surélevée de 8 mm à l'aide de vérins. Les mesures de la surface au repos ont ainsi été effectuées à deux niveaux différents ( $Z=0\text{ mm}$  et  $Z=-8\text{ mm}$ ). Les résultats de la

hauteur reconstruite sont représentés sur la figure 9. Ces deux surfaces présentent une courbure pouvant résulter d'une mauvaise prise en compte des distorsions dans le modèle de caméra en raison de la calibration partielle du repère image. De plus, des points de mesure erronés sont présents proche de la coque du modèle en raison de la réflexion du faisceau sur la paroi de la maquette. Le calcul de la différence de hauteur entre ces deux mesures donne une valeur moyenne de 7,3 mm et un écart-type de 3,6 mm. Une détection de l'impact laser sous-pixel devrait améliorer la précision de la mesure. Les pas moyen  $dx$  et  $dy$  de la grille projetée sur la surface sont estimés à partir de cette mesure. Ils sont respectivement de 125 mm et de 110 mm. Pour la reconstruction de la surface autour de la maquette, la hauteur locale estimée au niveau zéro (figure 9.a) est soustrait à celle mesurée en présence de vagues.

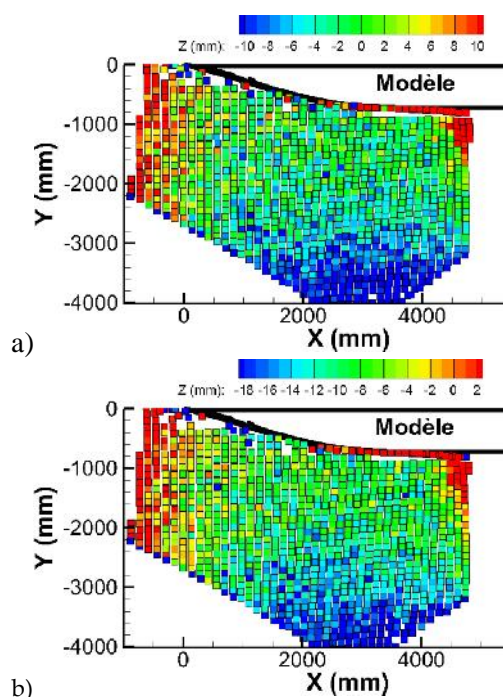


Figure 9 Mesures de plan d'eau au repos avec le système stéréoscopiques #2 : a) Mesure à  $Z=0\text{ mm}$  b) Mesure à  $Z=-8\text{ mm}$  (plate-forme sur vérins)

### 4.2 Mesure du champ de vagues

Le champ de vagues a été mesuré pour trois vitesses de modèle : 1,65 m/s, 2,2 m/s et 2,95 m/s. Pour ces deux premières valeurs les surfaces reconstruites sont présentées sur la Figure 10. Pour la vitesse la moins élevée, les amplitudes des ondes mesurées sont de l'ordre de 30 mm. Dans ce cas la surface est bruitée mais les vagues générées par le modèle sont apparentes. Pour la vitesse de 2,2 m/s, l'amplitude des ondes est d'environ 60 mm. Dans ce cas, le champ de vagues est mieux défini. Toutefois, derrière la crête de la deuxième vague, une zone où la surface n'est pas mesurée est observée.

Pour la vitesse de 2,95 m/s, la surface mesurée avec la technique proposée ici est comparée avec les données de hauteur fournies par Perelman *et al.* [2011] (Figure 11). Ces données sont issues de mesures de surface réalisées à partir d'une méthode linéique basée sur l'utilisation d'une tranche laser immergée. Les champs de vagues déterminés par ces deux méthodes ont des caractéristiques similaires et semblent être en accord (Figure 11.a). Dans les deux cas, la vague d'étrave proche du modèle n'est pas correctement mesurée. Ceci est expliqué par le fait que cette vague déferle pour cette vitesse d'avancée. En adaptant le traitement des images dans cette région, la technique de projection devrait permettre d'estimer la hauteur de la surface dans cette zone. La comparaison des résultats fournis par les deux méthodes sur une ligne longitudinale localisée à  $Y=2000$  mm est présentée sur la Figure 11.b. Cette comparaison révèle également un bon accord de l'évolution des hauteurs estimée avec les deux techniques avec des différences inférieures au centimètre. En prenant la méthode linéique comme référence, les erreurs de reconstruction de la surface sont de l'ordre de 10 mm. Ces erreurs sont toutefois faibles compte tenu de l'étendu de la zone de mesure ( $4 \times 7$  m<sup>2</sup>) et des amplitudes mesurées. Pour une vitesse de 2,95 m/s, l'amplitude des ondes est de 130 mm. Une incertitude de 10 mm correspond donc à une erreur de l'ordre de 7,7 %.

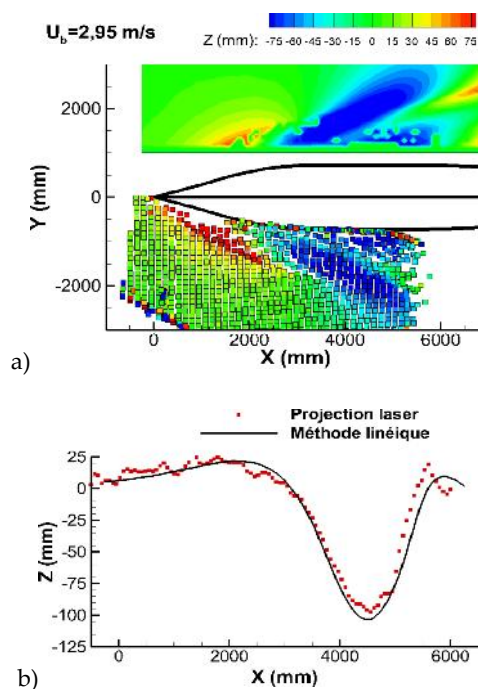


Figure 11 Mesure de la surface à 2,95 m/s (système stéréoscopique #2) et comparaison avec des mesures linéiques (Perelman *et al.* [2011]) : a) Surface reconstruite b) Ligne longitudinale  $Y=2000$  mm

### 4.3 Effets d'échelle

Afin d'analyser les effets d'échelles, des mesures de surface autour du même modèle de navire à l'échelle 1 :77,5 ont été réalisées. Cette échelle correspond à une longueur de maquette de 1,2 mètre. Ces mesures ont été effectuées à partir de deux méthodes de mesures optiques, la première basée sur une techniques de stéréo-corrélation d'images et l'autre sur de la stéréo-réfraction (Gomit [2013]). Ces mesures permettent de comparer les champs de vague aux deux échelles, 1 :10 et 1 :77,5.

Des mesures de hauteur autour de la maquette de plus grandes dimensions ont été obtenues à partir de la méthode de projection décrite dans ce papier. Ces résultats ont été comparés à des données issues d'une méthode de mesure de surface linéique (Perelman *et al.* [2011]). Cette comparaison a montré le bon accord entre ces données et les mesures entreprises à partir de la méthode de projection développée durant cette thèse. Les mesures linéiques étant cependant effectuées sur une longueur de champ plus importante, elles sont utilisées ici pour évaluer l'effet d'échelle.

La Figure 12 fourni la comparaison des champs de vagues reconstruit aux deux échelles étudiées. La mesure autour de la maquette à l'échelle 1 :10 correspond à la partie à l'intérieur du rectangle. Pour permettre cette comparaison, les hauteurs de la surface sont adimensionnées à partir de l'amplitude maximale estimée sur la ligne longitudinale  $Y/L_b=0,2$ . La géométrie du champ de vagues est identique aux deux échelles. Cette représentation permet de

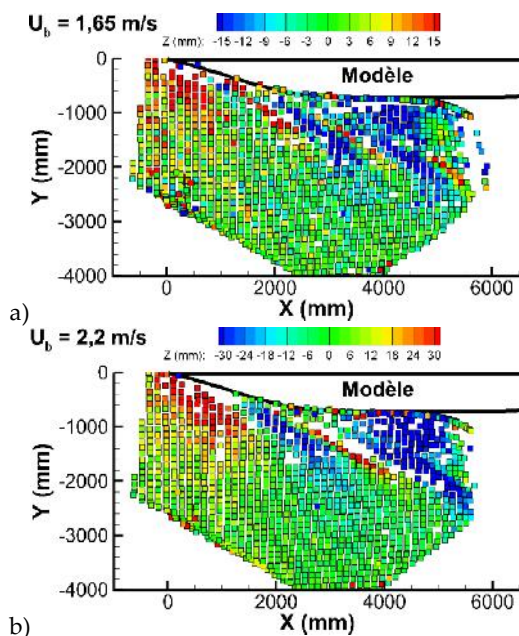


Figure 10 Mesure de la surface avec le système stéréoscopique #2 : a)  $U_b = 1,65$  m/s b)  $U_b = 2,2$  m/s

visualiser le bon accord entre les positions des vagues au niveau de la limite du rectangle. Les coupes longitudinales, localisées respectivement à  $Y/L_b=0,2$  (Figure 13.a) et à  $Y/L_b=0,375$  (Figure 13.b), montrent également des évolutions de surface similaires entre les deux échelles. Des disparités sont toutefois observées sur les ondes de faibles amplitudes, par exemple à  $X/L_b \approx 0,5$  (Figure 13.a) et à  $X/L_b \approx 0,8$  (Figure 13.b). Ces écarts peuvent être dus à des effets de tension de surface dans le cas du modèle à l'échelle 1:77,5.

On note également, que les effets d'échelles sur la forme de la surface dus aux effets visqueux sont essentiellement présents au niveau du sillage issu de la poupe du modèle. Ici, les mesures à grande échelle étant seulement disponibles proche de la maquette, cet effet ne peut pas être évalué.

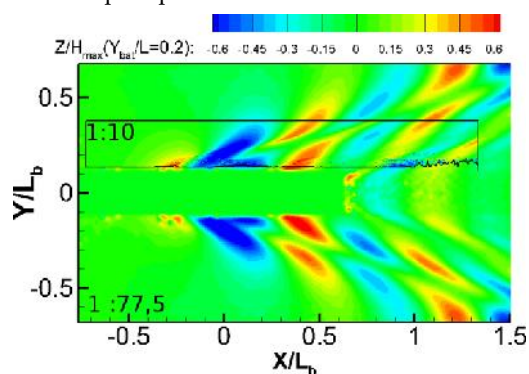


Figure 12 Effet d'échelle : Champs de vagues reconstruits aux deux échelles

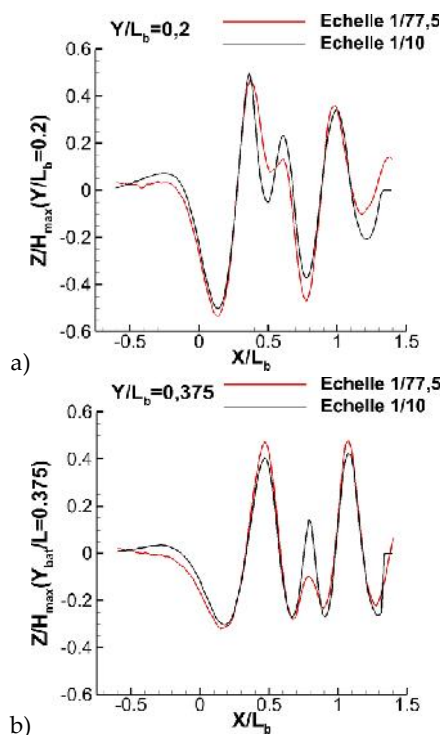


Figure 13 Effet d'échelle : a) Comparaison sur la ligne longitudinale  $Y/L_b=0,2$  b) Comparaison sur la ligne longitudinale  $Y/L_b=0,375$

### 5 Conclusions

Une méthode de mesure de surface libre adaptée aux champs de grandes dimensions a été proposée. Cette technique de mesure a été appliquée au sein du bassin des carènes de la DGA (B600) et a permis de mesurer le champ de vagues stationnaire généré par une maquette de navire maritime. La méthode a été comparée à une méthode de mesure linéique basée sur l'utilisation d'une tranche laser immergée. L'incertitude de la mesure a été estimée de l'ordre du centimètre sur un champ de vision de  $4 \times 7 \text{ m}^2$ . Ces mesures ont également permis d'évaluer l'effet d'échelle sur la surface libre le long du navire par comparaison avec des mesures réalisées autour d'un modèle de petites dimensions.

La méthode proposée dans ce papier permet donc d'estimer précisément des surfaces stationnaires sur des champs de vision important. La projection de ligne ou directement de grille de points pourrait permettre de mesurer des phénomènes instationnaires. Des mesures de champs de vagues autour de modèle de navire en présence de houle pourraient alors être envisagées.

### 6 Remerciements

Les travaux de thèse de G. Gomit ont été financés par la Direction Générale de L'Armement.

### 7 References

- [1] Kim, WJ., Van, SH. & Kim, DH., (2001) Measurement of flows around modern commercial ship models. *Experiments in Fluids*, 31:567-578
- [2] Chatellier, L., Jarmy, S., Gibouin, F., & David, L. (2013). A parametric PIV/DIC method for the measurement of free surface flows. *Experiments in Fluids*, 54(3), 1-15.
- [3] Gomit, G., Chatellier, L., Calluaud, D., & David, L. (2013). Free surface measurement by stereo-refraction. *Experiments in Fluids*, 54(6), 1-11.
- [4] Gomit, G. (2013) Développement de techniques de mesure de surfaces libres par moyens optiques : Application à l'analyse de l'écoulement généré par un modèle de bateau en bassin des carènes. *Thèse de l'université de Poitiers*
- [5] Perelman, O., Wu, C.H., Boucheron, R., & Fréchou, D. (2011) 3D wave fields measurements techniques in model basin: application on ship wave measurement. The 2nd International Conference on Advanced Model Measurement Technology for EU Maritime Industry
- [6] Zhang Z. (2002). A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Pattern Analysis and machine intelligence*, 22(11):1330:1334