

**DEVELOPPEMENT ET APPLICATIONS DE  
TECHNIQUES DE MESURES OPTIQUES POUR L'ANALYSE  
DE SILLAGES DE NAVIRE EN BASSIN DES CARENES**

***DEVELOPMENT AND APPLICATIONS OF OPTICAL  
METHODS FOR FREE SURFACE MEASUREMENTS FOR  
THE ANALYSIS OF SHIP WAVES IN TOWING TANKS***

**G. GOMIT<sup>\*</sup>, D. CALLUAUD<sup>\*</sup>, L. CHATELLIER<sup>\*</sup>, L. DAVID<sup>\*</sup>, D. FRECHOU<sup>\*\*</sup>**

<sup>\*</sup> Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, 86962 Futuroscope Chasseneuil,

<sup>\*\*</sup> DGA techniques hydrodynamiques, 27100 Val de Reuil,

*guillaume.gomit@univ-poitiers.fr*

**Résumé**

Cette étude porte sur le développement de méthodes de mesure optiques pour la détermination de surfaces libres et leur application à la mesure des ondes générées par un modèle de navire en bassin des carènes. Deux méthodes sont présentées. La première est basée sur un système de stéréovision et sur l'emploi de procédures d'inter-corrélation d'images. La seconde méthode est basée sur la théorie de la réfraction de la lumière au travers d'une interface. Ces deux types de méthode sont appliqués à la mesure du champ de vague autour d'un modèle de navire. Ces mesures permettent la reconstruction et l'analyse du sillage d'une carène naviguant en milieu confiné. Les principales caractéristiques du sillage et leur dépendance au nombre de Froude peuvent ainsi être étudiées.

**Summary**

This study focuses on the development of optical methods for the measurement of free surfaces and their application to the measurement of waves generated by a ship model in a towing tank. Two methods are presented. The first method is based on a stereo vision system and on the cross-correlation of images. The second is based on the theory of light refraction across optical interfaces. These two kinds of methods are applied to the measurement of the wave field around a model ship. These measurements allow the reconstruction and the analysis of the wake of a ship sailing in confined areas. Therefore, the main characteristics of the wake and the dependence on Froude number on these properties can be studied.

## **I – Introduction**

Les mesures des ondes générées par des modèles de navire en bassin des carènes sont généralement réalisées à partir de capteurs type sondes résistives, houlomètres lasers ou sondes acoustiques. Ces techniques ponctuelles restent toutefois limitées pour l'identification d'un sillage dans son ensemble. Cette étude porte sur le développement de techniques de mesures de surface libre à partir de méthodes optiques et leurs applications aux ondes générées par un bateau en bassin des carènes. Ces méthodes optiques présentent l'intérêt d'être non-intrusives et de permettre une mesure globale d'un champ de vagues. Deux types de méthodes ont été utilisés aux cours de nos travaux pour mesurer les champs de vagues, proches et lointains, générés par un modèle de navire en bassin des carènes.

Le premier type de méthode appliqué au cours de cette étude est basé sur la corrélation d'images stéréoscopiques. Ces techniques s'appuient sur la prise de vue d'images de la surface par un système de plusieurs caméras et sont couramment utilisées en mécanique des fluides notamment pour mesurer des ondes à la surface de la mer (Wanek et Wu [2006]). Ces méthodes sont bien adaptées à ce type de d'application car la présence de rides et clapots permet l'acquisition d'images comportant des variations de niveaux de gris convenant à l'emploi de procédures d'inter-corrélation des images. L'utilisation et la mise en œuvre de ces techniques en bassin d'essais reste cependant plus complexe car la structure de l'interface et son image acquise par les caméras ne présentent pas les mêmes caractéristiques, rendant nécessaire l'utilisation d'artifice pour repérer la surface. Dans cette étude des billes flottant en polypropylène à la surface de l'eau ont été utilisées comme marqueur. La méthode présentée a permis de mesurer les champs de vague sur le côté du modèle mais est difficilement adaptable pour la partie à l'arrière du navire, au niveau de la ligne d'avancée. Il est en effet difficile de déposer et de conserver des marqueurs de surface dans cette partie de l'écoulement. Une deuxième méthode, sans marqueur de surface, a donc été développée et appliquée dans la zone de l'écoulement correspondant au sillage du bateau, le long de la ligne d'avancée.

Cette deuxième méthode est basée sur la théorie de réfraction de la lumière au travers d'un dioptre optique. Ce principe a été utilisé dernièrement par plusieurs équipes de recherche (Fouras et al. [2008], Moisy [2009]). Ces techniques s'appuient sur la mesure de la déformation apparente d'un motif situé sous la surface libre due à la visualisation au travers du dioptre optique défini par l'interface air/eau. L'analyse de ce déplacement apparent permet de déterminer la forme de la surface à partir de la loi de Snell-Descartes. La méthode utilisée au cours de nos travaux s'appuie sur le déplacement apparent d'un motif situé sous la surface vue à partir de deux points de vue (Morris [2004]). Le motif est généré à l'aide d'une nappe laser parallèle à la surface libre au repos et située sous la surface. Cette méthode de mesure nous permet de mesurer simultanément la surface libre à l'arrière du bateau et le champ de vitesse bidimensionnel au niveau de la nappe laser.

Ces deux types de méthodes optiques ont été utilisés dans le bassin des carènes de l'Institut Pprime de Poitiers afin de mesurer le champ de vagues généré par un modèle de bateau. Les essais ont été réalisés pour trois nombres de Froude 0,36, 0,48 et 0,52. Les résultats obtenus permettent une analyse précise des caractéristiques du champ de vagues autour d'un modèle de navire en milieu confiné et de leur évolution en champ proche et lointain en fonction du nombre de Froude.

## II – Présentation des méthodes de mesure

### II – 1 Méthode basée sur la corrélation d'images issues d'un système de stéréovision

La première technique de reconstruction de surface utilisée dans cette étude a été proposée par Chatellier et al. [2010] et est basée sur les techniques de corrélation d'images stéréoscopiques et sur une représentation eulérienne de la surface dans un système de coordonnées cartésiennes.

Cette technique de mesures de surface nécessite une calibration tridimensionnelle des caméras. Cette étape de calibration consiste à trouver la relation entre le repère image des caméras et le repère physique où s'effectue la mesure. Dans cette étude, un modèle de calibration linéaire a été utilisé. Ce modèle peut s'écrire sous la forme d'une matrice  $3 \times 4$  telle que :

$$\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

où  $(u_i, v_i)$  sont les coordonnées images,  $(X_i, Y_i, Z_i)$  les coordonnées physiques correspondantes et  $m_{ij}$  les paramètres de la matrice de calibration, notée  $M$ . Cette matrice est déterminée en traduisant dans le champ de vision des caméras une mire (2D ou 3D) comportant des points dont les positions sont connues avec une grande précision. A partir de l'ensemble de ces points tridimensionnels et de leurs projections sur les images, les paramètres du modèle de calibration des caméras, c'est à dire les coefficients  $m_{ij}$ , peuvent être estimés.

Pour la reconstruction de surface, le domaine fluide est représenté par un système de coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$  où le plan  $(x, y)$  correspond au plan de référence, typiquement le plan d'eau au repos. Des positions d'intérêts,  $(x_0, y_0)$ , appartenant au plan de référence sont définies. Pour chacun de ces points d'intérêts, une zone carrée autour de  $(x_0, y_0)$  est définie ainsi qu'un paramètre,  $p_s$ , comprenant la hauteur, l'orientation et la courbure de la portion de surface correspondante :

$$p_s = \left( h, \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 h}{\partial yx} \right) \quad (2)$$

Ainsi, pour un point  $(x,y)=(x_0+\Delta x, y_0+\Delta y)$  situé suffisamment proche de  $(x_0,y_0)$ , sa hauteur  $z$ , peut être exprimée à partir d'un développement de Taylor de  $h$  en  $(\Delta x, \Delta y)$  sous la forme :

$$z = h + \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial h}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \frac{\Delta x^2}{2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \frac{\Delta y^2}{2} + \frac{\partial^2 h}{\partial yx} \Delta y \Delta x \quad (3)$$

Connaissant les matrices de calibration de chaque caméra,  $M$ , les coordonnées images  $(u, v)$  correspondant au point objet  $(x, y, z)$  sont calculées par projection à l'aide de l'équation (1).

A partir d'un prédicteur de l'état de surface (hauteur, orientation, courbure), les coordonnées image d'une portion de surface centrée en  $(x_0, y_0)$  peuvent donc être calculées sur chaque caméra. Une fois ces coordonnées déterminées, une interpolation bilinéaire est utilisée pour reconstruire les images correspondantes. Pour un système stéréoscopique comportant deux caméras, le coefficient de corrélation entre les images de la portion de surface centrée en  $(x_0, y_0)$  peut s'écrire sous la forme :

$$C(p_s) = \frac{\sum_{\Omega(x_0, y_0)} (g_1(u_1, v_1) - \bar{g}_1)(g_2(u_2, v_2) - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum_{\Omega(x_0, y_0)} (g_1(u_1, v_1) - \bar{g}_1)^2} \sqrt{\sum_{\Omega(x_0, y_0)} (g_2(u_2, v_2) - \bar{g}_2)^2}} \quad (4)$$

où  $\Omega(x_0, y_0)$  correspond à une zone carrée autour de  $(x_0, y_0)$  définie par une liste de points physiques  $(x, y)$  pour lesquels la fonction décrivant les niveaux de gris correspondant aux images,  $g_i(u_i, v_i)$ , est évaluée pour être inter-corrélée. L'algorithme de reconstruction de surface au point  $(x_0, y_0)$  est basé sur l'optimisation de la forme de la surface dans le but de maximiser ce coefficient de corrélation.

Pour chacun de ces points d'intérêts  $(x_0, y_0)$  l'algorithme de reconstruction de surface peut donc être résumé de la façon suivante :

- 1) Un prédicteur de l'état de l'interface (hauteur, orientation et courbure) est estimé.
- 2) A partir de ce prédicteur, on reconstruit l'image d'une portion de surface carrée centrée en  $(x_0, y_0)$  par projection sur les images de l'écoulement à partir des matrices de calibration. Pour cette étape une interpolation bilinéaire est réalisée pour la reconstruction de l'image.
- 3) Les images correspondant à la fraction de surface en  $(x_0, y_0)$  issues de chaque caméra sont ensuite inter-corrélées pour définir un coefficient d'inter-corrélation afin de quantifier leur correspondance.

Ce processus est réalisé itérativement en cherchant à optimiser la forme de la surface pour maximiser le coefficient d'inter-corrélation entre les deux images.

## II – 2 Méthode basée sur la réfraction

Cette méthode s'appuie sur l'analyse du déplacement apparent d'un motif de référence situé sous la surface du fluide. Ce déplacement, du à la réfraction de la lumière et à la déformée de la surface suit la loi de Snell-Descartes et peut s'écrire sous la forme :

$$\eta_{air} \|\mathbf{i} \times \mathbf{n}\| = \eta_{eau} \|\mathbf{r} \times \mathbf{n}\| \quad (5)$$

où  $\eta_{air}$  et  $\eta_{eau}$  sont les indices de réfraction de l'air et de l'eau,  $\mathbf{i}$  le vecteur incident dans l'air  $\mathbf{r}$  le rayon réfracté dans le liquide et  $\mathbf{n}$  le vecteur normal à la surface. Ces trois vecteurs sont coplanaires. En utilisant la loi de Snell-Descartes, le vecteur normal peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\mathbf{n} = (\beta \mathbf{i} - \mathbf{r}) / \|\beta \mathbf{i} - \mathbf{r}\| \quad (6)$$

où  $\beta$  est égal à  $\eta_{air} / \eta_{eau}$ .

Soit un rayon incident issu du centre d'une camera,  $C_1$ , jusqu'à un point  $P(x, y, z)$  supposé sur la surface, l'image vue sur la caméra correspond à un point  $X_1(x_1, y_1, z_{ref})$  du motif de référence comme décrit sur la figure 1.a. A partir des points  $C_1$ ,  $P$  et  $X_1$  les vecteurs incidents et réfractés peuvent être calculés à partir des relations suivantes :

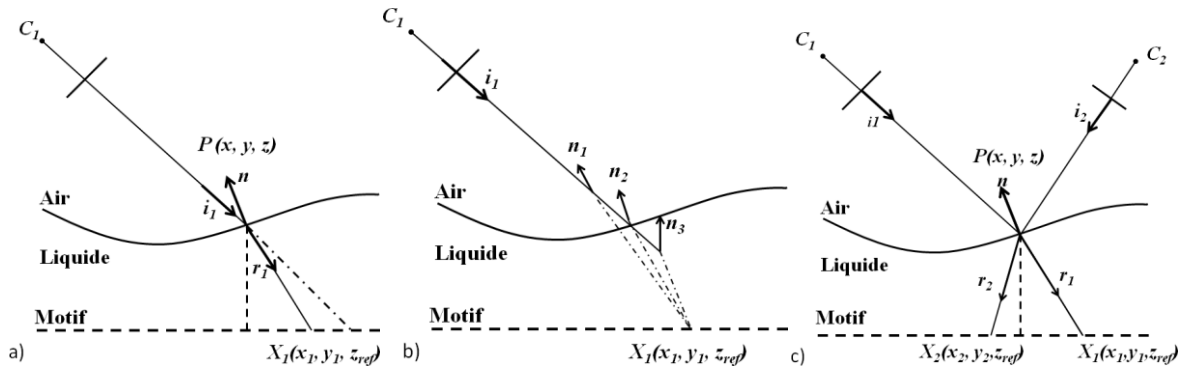
$$\mathbf{i}_1 = \frac{P - C_1}{\|P - C_1\|}, \mathbf{r}_1 = \frac{X_1 - P}{\|X_1 - P\|} \quad (7)$$

Connaissant les vecteurs incidents et réfractés, le vecteur normal à la surface  $\mathbf{n}_1$  au point  $P$ , supposé sur la surface, peut être calculé à partir de l'équation 7. Cependant pour un vecteur incident  $\mathbf{i}_1$  et un point  $X_1$  sur le motif de référence, il existe une infinité de couples  $P$  et  $\mathbf{n}$  comme illustré sur la figure 1.b. Dans le but de fermer le problème, une seconde caméra est

utilisée. Cette deuxième caméra fournit un second vecteur  $i_2$  passant par le point  $P$  et le vecteur réfracté correspondant,  $r_2$ , passant par  $X_2$  (figure 1.c). A partir de ces deux nouveaux vecteurs, le vecteur  $n_2$  vu par la caméra 2 peut être calculé à l'aide de l'équation 7. En pratique, cette deuxième caméras nous permet de vérifier si le point  $P$  est bien sur la surface ou non. En effet si le point  $P$  est sur la surface, les deux vecteurs normaux à la surface  $n_1$  et  $n_2$  sont égaux. Un critère d'égalité entre les deux vecteurs doit donc être défini. Ici, nous utilisons le critère proposé par Morris (2004) défini de la façon suivante :

$$E_n = \cos^{-1}(n_1 \cdot n_2) \quad (8)$$

Quand les deux vecteurs deviennent colinéaires, le critère  $E_n$  tend vers zéro.

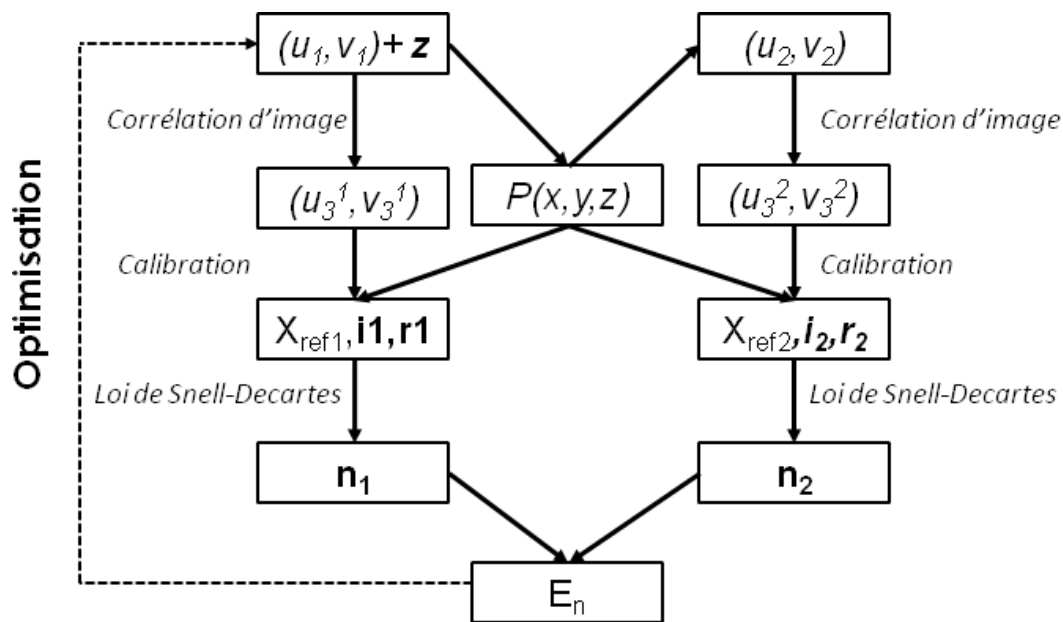


**Figure 1** Réfraction de la lumière dans un cas bidimensionnel : a) Réfraction d'un rayon incident b) Solution multiples pour un rayon incident et un point réfracté X donné c) Configuration optique du système à deux points de vue

Cette méthode est donc basée sur la connaissance d'un motif de référence situé sous la surface et sur la détermination du déplacement apparent de ce motif vu à travers la surface par deux points de vue différents. Dans cette étude, le motif de référence est créé à l'aide d'une nappe laser située sous la surface et illuminant des particules ensemencées dans le fluide. Ce motif est donc similaire à ceux enregistrés lors d'acquisition type PIV. L'état de référence du motif, c'est à dire l'état non déformé, est fourni par une caméra située sous le bassin pendant que deux caméras situées au dessus de la surface fournissent l'état déformé du motif vu à travers l'interface. Un algorithme de corrélation type PIV, adapté aux images de réfraction, est ensuite utilisé pour déterminer le déplacement apparent entre les caméras situées au-dessus de la surface et la caméra de référence. Afin de pouvoir reconstruire les rayons optiques connaissant ce déplacement apparent du motif sur les images, une étape de calibration des caméras similaire à celle utilisée pour la technique de stéréovision est préalablement effectuée.

Une fois le déplacement apparent déterminé sur chaque caméra, un maillage définissant les points de mesures est défini sur la caméra 1. Sur chaque point de ce maillage, la surface est reconstruite à partir de l'algorithme de reconstruction présenté sur la figure 2. Pour un point  $(u_1, v_1)$  du maillage de la caméra 1 et une hauteur supposée de la surface  $z$ , le point  $P$  peut être calculé à partir du modèle de caméra de la caméra 1. A partir de ce point  $P(x, y, z)$ , le point correspondant sur la caméra 2,  $(u_2, v_2)$ , est déterminé par projection à l'aide du modèle de calibration. L'application de l'algorithme de corrélation entre l'image de référence et les images provenant des caméras situées au dessus de la surface donne le déplacement apparent du motif sur les images. Les rayons optiques, incident et réfracté, de chaque caméra peuvent alors être calculés. A partir de ces rayons optiques et de la loi de Snell-Descartes, le vecteur

normal « vu » par chaque caméra est estimé et le critère d'optimisation calculé. Un processus itératif visant à minimiser  $E_n$ , en fonction de  $z$  est ensuite exécuté.



**Figure 2** Algorithme de reconstruction de surface

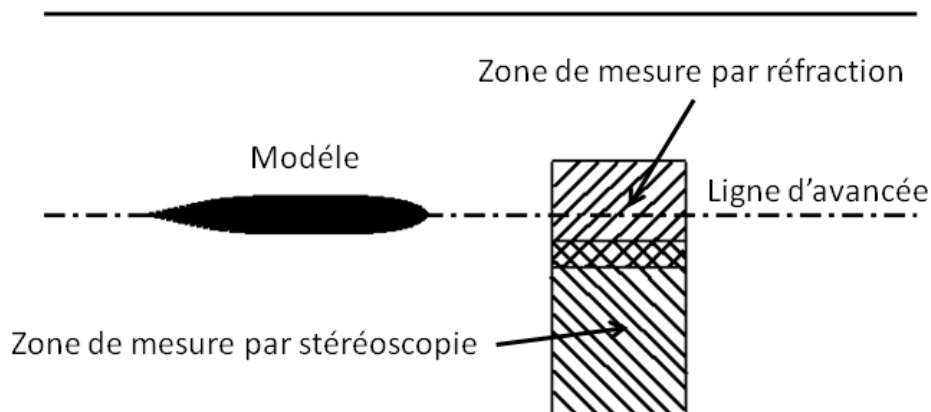
En plus des corrélations d'image réalisées pour mesurer le déplacement apparent du motif, un traitement PIV permet d'estimer le champ de vitesse bidimensionnel dans le plan de la nappe laser. Ce traitement PIV est effectué sur les images successives de la caméra de référence située en dessous du bassin des carènes. Cette technique nous permet donc de mesurer simultanément, la position de la surface et la vitesse 2D-2C sous la surface au niveau de la nappe laser.

### **III – Application en bassin des carènes**

Les mesures de sillages ont été réalisées dans le bassin des carènes de l'Institut Pprime à Poitiers. Ce bassin mesure 23 mètres de long pour une largeur de 1.5 mètres et une profondeur maximale de 1.2 mètres. Il est équipé d'un chariot de traction ayant une plage de vitesse de fonctionnement comprise entre 0.2 m/s et 2.5 m/s. Il est également équipé de hublots sur le côté et sur le fond du bassin. Ceux-ci permettent l'utilisation d'outils de mesures optiques tels que des lasers ou des caméras. Le modèle de bateau utilisé pendant ces tests correspond à un modèle de frégate à l'échelle 1/77.5. Sa longueur est de 1.2 mètres, pour une largeur de 19.5 cm et un tirant d'eau nominal de 6.59 cm.

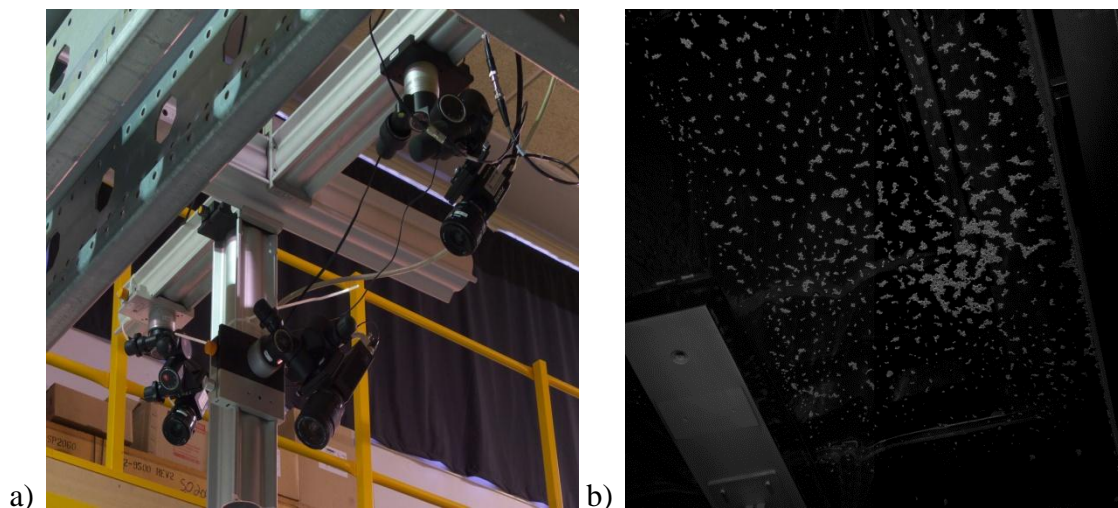
Les deux techniques de mesures sont appliquées sur des régions différentes de l'écoulement, figure 3. La méthode basée sur la stéréoscopie est appliquée sur une zone allant de la paroi du bassin jusqu'au niveau du bateau. Cette technique est difficilement applicable dans la zone à l'arrière du bateau, le long de la ligne de flottaison, car la mise en place de marqueurs de surface solides est difficile dans cette zone. Pour la deuxième technique basée sur la réfraction, la zone de mesure est limitée par les accès optiques du bassin, et notamment la position des hublots sous le bassin. Ces hublots sont situés au centre du bassin ce qui nous permet de mesurer la surface à l'arrière du bateau. Les deux méthodes utilisées sont donc complémentaires et permettent d'obtenir une mesure globale du champ de vagues généré au passage du bateau. On note que les deux techniques ne sont pas appliquées simultanément

mais sur des passages de bateau différents. La synchronisation des mesures avec la position du bateau permet ensuite de relier les résultats issus de chaque méthode.



**Figure 3** Zone de mesure des deux méthodes

Pour la méthode basée sur la stéréoscopie, trois caméras JAI (2048\*2048 pixels) sont disposées en configuration stéréoscopique (figure 4.a). Ces trois caméras sont calibrées en translatant une mire bidimensionnelle de points dans le domaine de mesures, défini par le champ de vision commun aux trois caméras, de dimensions 700 mm  $\times$  500mm. L'acquisition est effectuée à une fréquence de 10 Hz. Les marqueurs de surface utilisés pour repérer l'interface air-liquide et ainsi permettre la corrélation sont des billes de polypropylènes d'un diamètre moyen de 1 mm et d'une densité de 0,9 g/cm<sup>3</sup>. Un exemple d'image acquise durant les essais, est présenté sur la figure 4.b.



**Figure 4** a) Image du système de stéréovision b) Exemple d'image acquise par une caméra

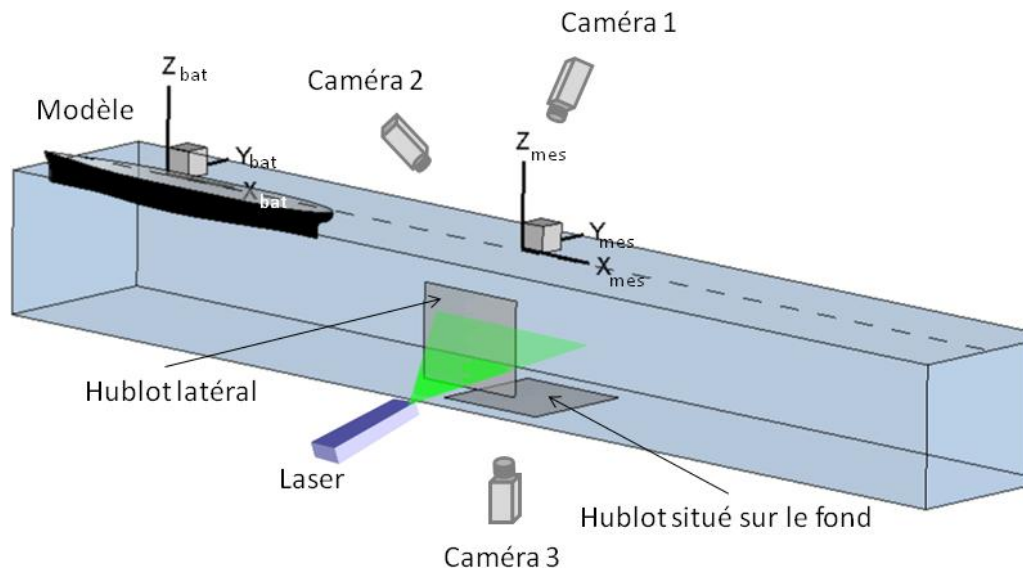
Pour la méthode basée sur la réfraction, l'écoulement estensemencé avec des particules en polyamide de diamètre 56  $\mu$ m et de densité 1,02 g/cm<sup>3</sup>. La nappe laser illuminant ces particules est générée à l'aide d'un laser Nd-Yag éclairant au travers d'un hublot latéral du bassin. Cette nappe laser est située 28 mm sous la surface. Le système optique est constitué de trois caméras JAI (1200\*1600 pixels), deux situées au dessus de la surface et une sous le bassin fournissant le motif de référence. Cette dernière caméra enregistre les images du motif à travers un hublot situé sur le fond du bassin. Pour cette mesure, le champ de vision commun aux caméras à pour dimension 400 mm  $\times$  400 mm. La calibration des caméras est également effectuée en translatant une mire de points dans le domaine de mesure. L'acquisition est

effectuée en mode *double exposition* à une fréquence de 10 Hz avec un  $\Delta t$  entre les deux images successives dépendant de la vitesse du modèle. Ce  $\Delta t$  est ajusté pour obtenir un déplacement des particules entre les deux images d'environ 8 pixels. Un schéma du montage expérimental comprenant les repères utilisés pour représenter les résultats est proposé figure 5.

Deux systèmes de coordonnées sont définis. Le premier système  $(O_{mes}/X_{mes}, Y_{mes}, Z_{mes})$  est lié à l'aire de mesure. L'origine correspond au centre de l'aire de mesure et est située au centre du bassin des carènes. L'axe  $X_{mes}$  est dirigé dans le sens opposé à l'avancée du bateau, l'axe  $Y_{mes}$  dans la direction transverse et la  $Z_{mes}$  vers le haut. La synchronisation des données avec la position du bateau permet de définir un second repère,  $(O_{bat}/X_{bat}, Y_{bat}, Z_{bat})$ , relié au bateau. Les axes de ce repère sont dirigés avec la même orientation que pour le repère précédent. Son centre correspond au centre du bateau et la relation entre ces deux repères peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} X_{ship} &= X^* + U_b \cdot t - X_0 \\ Y_{ship} &= Y^* \\ Z_{ship} &= Z^* \end{aligned} \quad (9)$$

où  $U_b$  est la vitesse du bateau,  $t$  l'instant d'acquisition et  $X_0$  la position du bateau à l'instant initial dans le repère  $(O_{mes}/X_{mes}, Y_{mes}, Z_{mes})$ .



**Figure 5** Schéma du montage expérimental de réfraction dans le bassin des carènes

Les essais en bassin des carènes ont été réalisés pour différents nombres de Froude basé sur la profondeur :

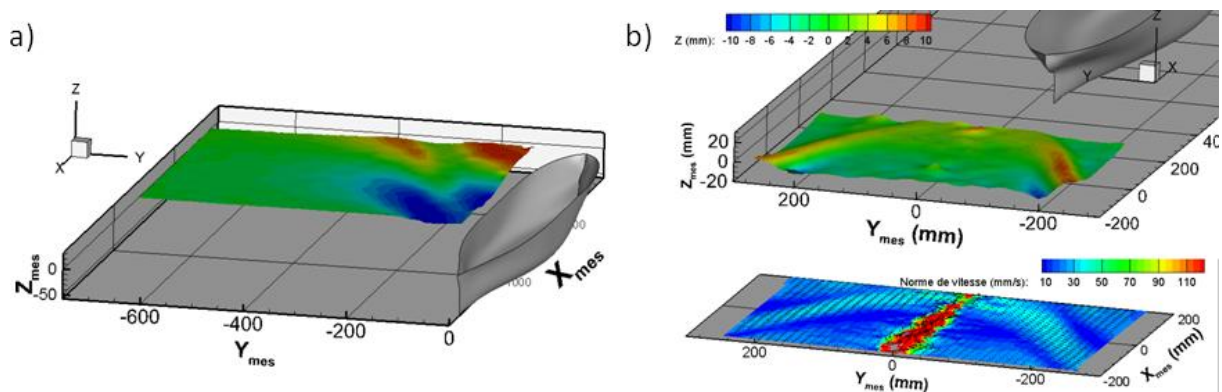
$$F_r = \frac{U_b}{\sqrt{gh}} \quad (10)$$

où  $U_b$  est la vitesse du bateau et  $h$  la profondeur d'eau. Ici, la hauteur  $h$  a été gardée constante durant les essais et égale à 50 cm. Le nombre de Froude dépend donc uniquement de la vitesse du modèle de bateau. Trois nombres de Froude 0,36, 0,48 et 0,52 ont été retenus.



## IV – Résultats

Les méthodes de mesures décrites précédemment et leur application en bassin des carènes permettent de mesurer le champ de vagues instantané généré par le passage du bateau dans les zones de mesure respectives à chaque technique. Des exemples de champs instantanés issus des deux méthodes sont présentés sur la figure 6. Ces résultats correspondent à un nombre de Froude de 0.48. La figure 6.a montre un champ de surface instantané mesurée par la méthode de stéréoscopie. Le temps d'acquisition représenté ( $t=1.1s$ ) correspond à une mesures sur le côté du bateau. On distingue la génération d'une vagues, creux et crête, par le modèle de carènes. Sur la figure 6.b, un résultat issu de la méthode de réfraction est représenté. Cette méthode permet de mesurer à la fois, la hauteur de la surface et le champ de vitesse bidimensionnel dans le plan laser. Ici le temps d'acquisition ( $t=0.4 s$ ) correspond à un temps juste à l'arrière du bateau. La surface révèle le champ de vague généré à la poupe du bateau avec la présence de vagues divergentes de chaque côté du bateau. Le champ de vitesse sous la surface peut être relié à la forme de la surface. Ce champ est divisé en deux zones. La première zone, le long de la ligne d'avancée du navire ( $Y_{mes}=0$ ) est caractérisée par des vitesses importantes dans l'écoulement. Dans cette zone le fluide est entraîné par le bateau. La deuxième zone, de chaque côté du bateau correspond, à un écoulement associé à des ondes de surface et présente la même orientation que les crêtes visibles sur la surface.

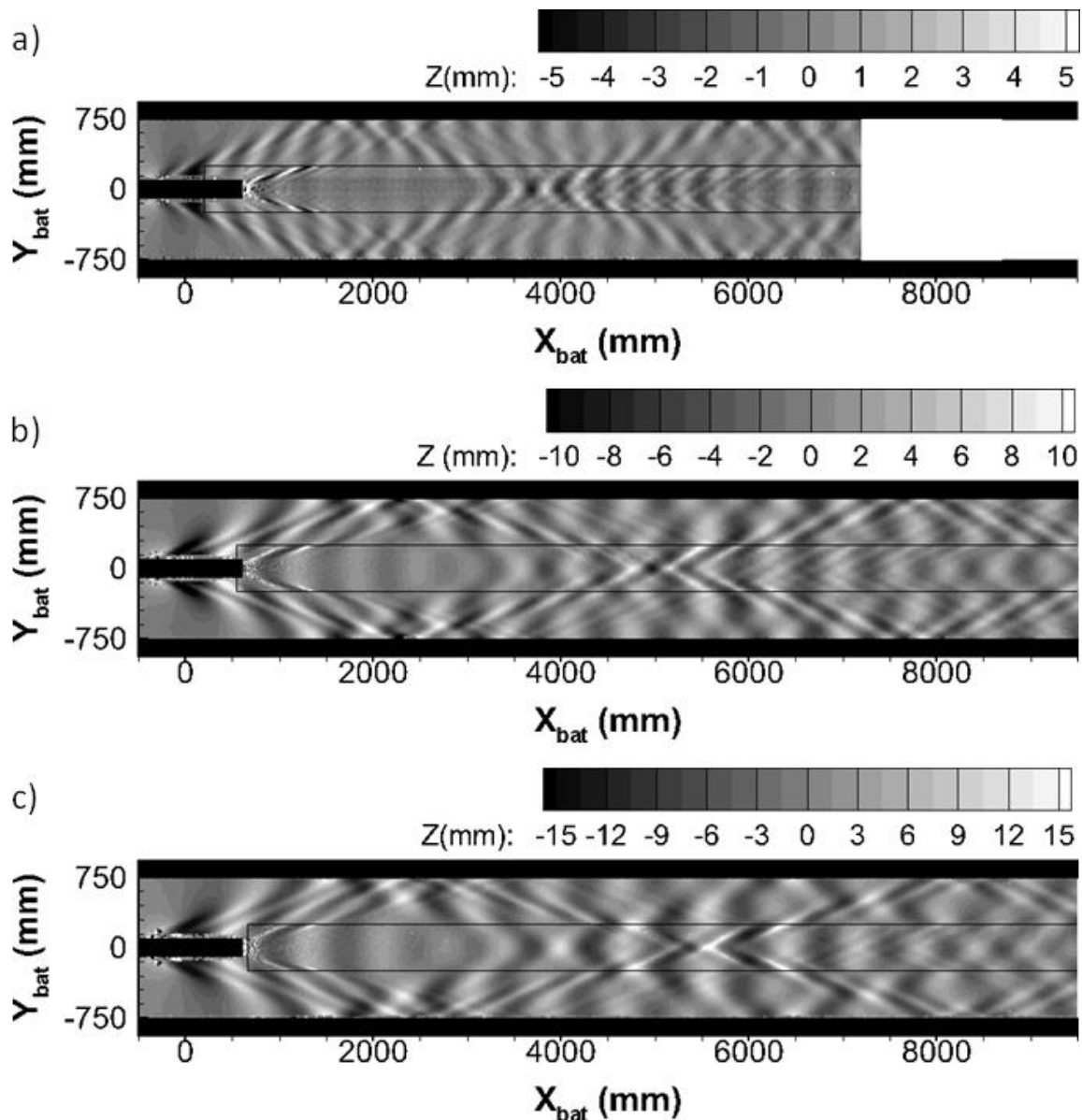


**Figure 6** Mesures instantanées : a) Surface reconstruite par la méthode de stéréovision b) Surface et champs de vitesse reconstruite par la méthode de réfraction

A partir des champs instantanés de hauteurs fournis par les deux méthodes et en considérant le champ de vagues stationnaire par rapport au bateau, il est possible de reconstruire la surface dans le repère  $(0_{bat}/X_{bat}, Y_{bat}, Z_{bat})$  relié au bateau à partir des relations de l'équation (5). La figure 7 montre les champs de vagues reconstruits pour les trois nombres de Froude retenus. Pour chaque cas, la partie centrale, comprise dans le rectangle, correspond aux résultats issus de la méthode de réfraction et la partie située sur le côté à la méthode basé sur la stéréoscopie. Les résultats fournis par les deux techniques s'accordent correctement sur tout le sillage du navire.

Les conditions de l'écoulement se rapportent au passage d'un bateau dans un milieu confiné en profondeur finie. Le sillage proche du bateau correspond au sillage classique de Kelvin. Ce sillage est constitué de deux systèmes de vagues générés à l'avant et à l'arrière du bateau. Ces deux systèmes sont ensuite réfléchis par les parois du bassin et interagissent à l'arrière du bateau. Les hauteurs de vagues augmentent avec le nombre de Froude. Cette évolution correspond aux mesures réalisées dans le cas d'écoulement en canal (Johnson 1958). Pour ce type d'écoulement, la hauteur des vagues augmente avec le nombre de Froude jusqu'à une valeur limite. Passé ce seuil, la hauteur des vagues converge vers une valeur constante. Les nombres de Froude étudiés ici sont donc inférieurs à cette valeur critique.

Les méthodes optiques utilisées au cours de ces mesures permettent donc d'obtenir une représentation globale du champ de vagues généré par le modèle de bateau au sein du bassin. Ces représentations mettent en évidence les différentes zones (i) de réflexions des ondes obliques sur la paroi du canal mais également (ii) les zones d'interférence constructrices ou destructrices entre les différents systèmes de vagues (ondes de proue, onde de poupe et leurs réflexions). La première zone rencontrée dans le sillage du bateau correspond à l'interaction entre les ondes générées par le navire et la paroi du bassin. Cette région est marquée par des hauteurs de vagues importantes. Les systèmes de vagues réfléchis par la paroi interagissent ensuite à l'arrière du bateau au niveau de la ligne d'avancée. Cette zone est également marquée par des amplitudes de vagues élevées. On note que la position de cette zone d'interférence évolue avec le nombre de Froude. En effet, cette zone s'éloigne du bateau avec l'augmentation du nombre de Froude. Pour un nombre de Froude de 0.36, cette zone est située à environ 3700 mm. Pour les nombres de Froude supérieurs, 0.48 et 0.52, elle est localisée respectivement à 5000 mm et 5500 mm. Après cette deuxième région d'interférence, on note la présence d'une deuxième zone de réflexion des ondes sur la paroi.

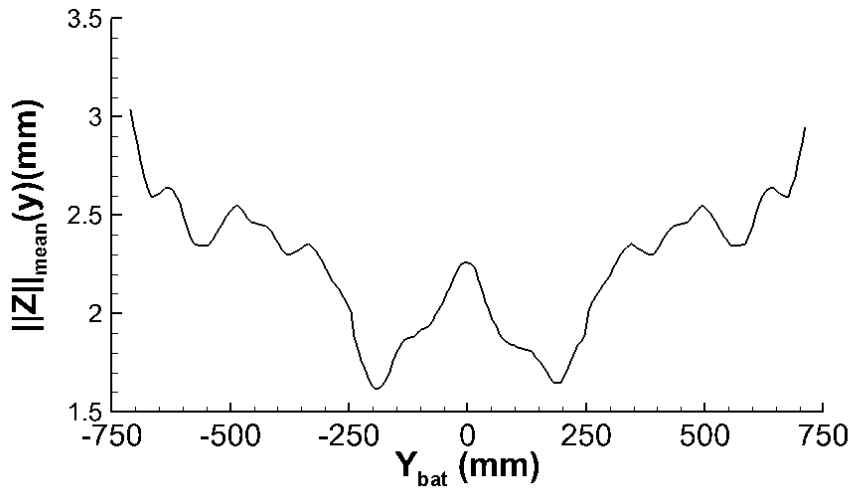


**Figure 7** Champ de vagues généré par le modèle de bateau : a)  $Fr=0,36$  b)  $Fr=0,48$  c)  $Fr=0,52$   
 Ces différentes régions d'interférence sont marquées par des fluctuations de hauteurs

importantes. Pour quantifier ces fluctuations et la localisation de ces régions dans le bassin, la fluctuation de surface moyenne sur les lignes longitudinales (lignes parallèles au bateau) est calculée :

$$\|Z_{mean}(Y_{bat})\| = \sum_i^N \frac{|Z(X_{bat}^i, Y_{bat})|}{N} \quad (11)$$

où  $Z$  correspond à la hauteur de la surface au point  $(X_{bat}, Y_{bat})$ , et  $N$  le nombre de points de mesure suivant la direction  $X$ . Le résultat permet de représenter, les fluctuations moyennes de la surface en fonction de la position transversale (figure 8). Cette figure met en évidence les zones de fortes fluctuations due à la présence de parois de chaque côté du bassin. Ces fluctuations sont le plus élevées près de la paroi, en  $Y_{bat} = -750$  mm et  $Y_{bat} = 750$  mm. La position centrale,  $Y_{bat} = 0$ , est également marquée par une augmentation des fluctuations de la surface. Cette augmentation est due à la région d'interférence, située au milieu du bassin, correspondant à l'interaction entre les différents systèmes de vagues réfléchis par les parois. De chaque côté de cette zones, à  $Y_{bat} = -200$  mm et  $Y_{bat} = 200$  mm, on note la présence d'une zone transversale où les fluctuations de surface sont faible. Cette région n'est pas affectée par les interactions dues à la paroi ni par la zone d'interférence constructives liées aux ondes réfléchies.



**Figure 8** Fluctuation de surface moyenne sur les lignes longitudinales

## V – Conclusion

Le développement de techniques de mesure de surface par moyens optiques à permis la mesure du sillage de bateau en bassin des carènes. Ces mesures permettent une analyse précise des ondes générées par un navire. Ces mesures ont mis en avant les caractéristiques du champ de vagues généré par un bateau en milieu confiné et notamment la présence de nombreuses zones d'interférences. Les caractéristiques de cet écoulement, positions des zones d'interférence où hauteurs des vagues par exemple, sont contrôlées par le nombre de Froude et le confinement du bassin. Ces mesures réalisées de façon non intrusive et avec une grande résolution spatiale donnent donc accès à l'ensemble du champ de vagues généré par le modèle de bateau et pourraient être utilisé comme base de données de référence pour des calculs numériques.

## **Remerciements**

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

## **Références**

- [1] JM. Wanek, CH. Wu. Automated trinocular stereo imaging system for three-dimensional surface wave measurements. *Ocean Engineering* 33:723–747, 2006
- [2] A. Fouras, D. LoJacono, G.J. Sheard, K. Hourigan. Measurement of instantaneous velocity and surface topography in the wake of a cylinder at low Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 24:1271–1277, 2008
- [3] F. Moisy, M. Rabaud, K. Salsac. A synthetic Schlieren method for the measurement of the topography of a liquid interface. *Experiments in Fluids* 46:1021–1036, 2009
- [4] N.J.W. Morris. Image-based water surface reconstruction with refractive stereo. *Master's thesis, Department of Computer Science, University of Toronto*, 2004
- [5] L. Chatellier, J. Jarny, F. Gibouin, L. David. Stereoscopic measurement of free surface flows. *14th International Conference on Experimental Mechanics, Poitiers, France*, 2010
- [6] J. Johnson. Ship waves in navigation channel. *Proc. 6th Conf. on Coast. Engineering Gainesville*, 666–690, 1958