



**ETUDE EXPERIMENTALE DES EFFETS DE HAUTEUR  
D'EAU FINIE ET DE CONFINEMENT LATERAL SUR LES  
SILLAGES DE NAVIRE EN BASSIN DES CARENES**

***EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTS OF FINITE  
WATER DEPTH AND LATERAL CONFINEMENT ON  
SHIPS WAKES IN A TOWING TANK***

**C. CAPLIER\*, G. ROUSSEAUX\*, D. CALLUAUD\*, L. DAVID\*,**

\* Institut Pprime, CNRS - Université de Poitiers - ISAE-ENSMA, UPR 3346  
Bâtiment H2, 11 Bd. Marie et Pierre Curie, F86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL Cedex,  
[clement.caplier@univ-poitiers.fr](mailto:clement.caplier@univ-poitiers.fr)

**Résumé**

Les ondes de batillage déstructurent les berges des fleuves, rivières et du trait de côte. Ce phénomène d'érosion des rives est principalement lié à la hauteur des vagues générées par les navires. Pour comprendre l'influence de la géométrie de la voie d'eau, de la forme du bateau et de sa vitesse sur la formation des ondes de batillage et sur l'amplitude des vagues générées, l'analyse du sillage des navires navigant dans la voie d'eau est indispensable. Cette étude propose une comparaison des sillages générés par deux carènes génériques de navires maritime et fluvial en bassin des carènes, pour différentes configurations de voie d'eau (eau profonde, eau peu profonde) et pour différents nombres de Froude. Les résultats sont obtenus à partir de mesures optiques non-intrusives donnant accès à une définition détaillée et complète du champ de vagues généré par ces navires et permettant une analyse fine des sillages mesurés. Les effets de la géométrie de la voie d'eau, de la forme et de la vitesse du bateau seront mis en évidence et quantifiés.

**Summary**

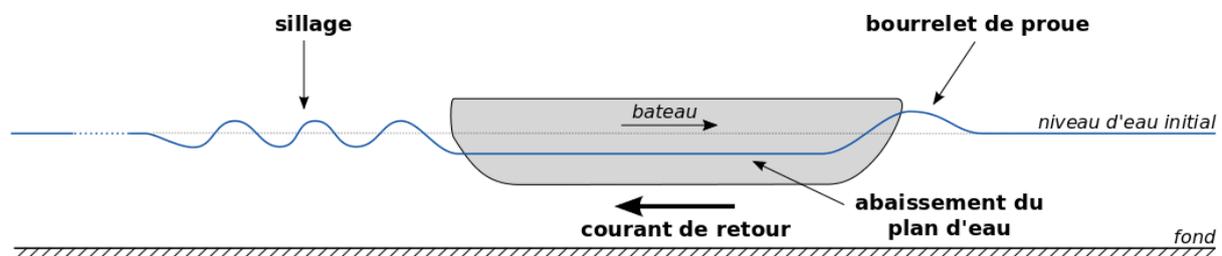
Wash waves produced by ships disintegrate river banks and coastal lines. This phenomenon of bank erosion is mainly due to the height of the waves. To understand the influence of the geometry of the water channel, the shape of the boat and its speed on the formation and the amplitude of wash waves, the analysis of the ships wakes in the water channel is essential. This study proposes a comparison of wakes generated by two generic hulls representative of maritime and fluvial ships. The wakes generated in deep water and shallow water configurations have been measured for different Froude numbers with non-intrusive optical stereovision methods, giving access to a detailed and complete definition of the generated wave fields and allowing a fine analysis of the wakes. The effects of the geometry of the water channel, the shape and the speed of the boat will be highlighted and quantified.

## I – Introduction

Différents facteurs régissent la formation des ondes de batillage et leurs amplitudes : géométrie de la voie d'eau, géométrie et vitesse du bateau, vitesse et sens du courant, etc. Lorsqu'un bateau navigue en milieu confiné (Figure 1), les effets de hauteur d'eau finie et de confinement latéral se traduisent par l'apparition d'un bourrelet de proue provoquant une augmentation de la résistance à l'avancement du navire (et donc de sa consommation), par une modification de la forme du sillage (abaissement du plan d'eau autour de la carène) et par des réflexions des vagues sur les berges. L'impact des vagues du sillage sur les berges provoque leur érosion et le phénomène d'abaissement du plan d'eau induit un courant de retour autour la carène, causant alors un transport sédimentaire pouvant créer un enlèvement de la voie d'eau et un danger pour la navigation.

Que ce soit pour étudier l'impact des ondes de batillage sur l'environnement ou la résistance à l'avancement, l'analyse du sillage généré par les navires est indispensable. Pour cela une caractérisation fine du champ de vagues est nécessaire. Les mesures des sillages générés 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 et des techniques plein-champs mesurant de façon précise la hauteur en différents points sont donc indispensables.

Les sillages de deux carènes génériques de navires maritime et fluvial ont été mesurés en bassin des carènes avec une méthode de mesure optique basée sur un principe de stéréovision [1],[2]. Cette méthode optique permet une mesure du sillage dans son ensemble et une reconstitution fine du champ de vague généré, permettant ainsi une comparaison des sillages pour différentes configurations de voie d'eau (eau profonde, eau peu profonde) et pour différents nombres de Froude, pour ainsi d'étudier l'influence des paramètres géométriques de la voie d'eau et du bateau. Nous présenterons dans un premier temps le dispositif expérimental de l'étude, à savoir le bassin des carènes, les deux modèles réduits de bateaux et la méthode de mesure par stéréovision. Ensuite nous présenterons les configurations étudiées pour tenir compte des effets de confinement latéral et de hauteur d'eau finie. Pour finir, les sillages mesurés pour les deux configurations de voie d'eau seront présentés et analysés. Les effets de la géométrie de la voie d'eau, de la forme et de la vitesse du bateau seront ainsi mis en évidence et quantifiés.



**Figure 1** – Représentation schématique de la navigation en milieu confiné.

## II – Dispositif expérimental

### II – 1 Bassin des carènes

Les mesures ont été réalisées dans le bassin des carènes de l’Institut Pprime de largeur  $W = 1,5m$ , de longueur  $L = 20m$  avec une hauteur d’eau  $h$  pouvant aller jusqu’à  $1,20m$  (Figure 2). Le canal possède un chariot monté sur rails auquel est fixé la carène. Le déplacement du chariot est contrôlé par un ordinateur et la vitesse maximale de déplacement est de  $2,35m.s^{-1}$  (Figure 3).

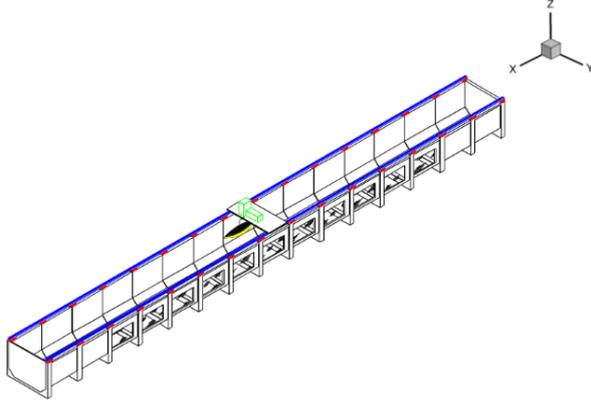


Figure 2 – Vue en perspective du bassin.

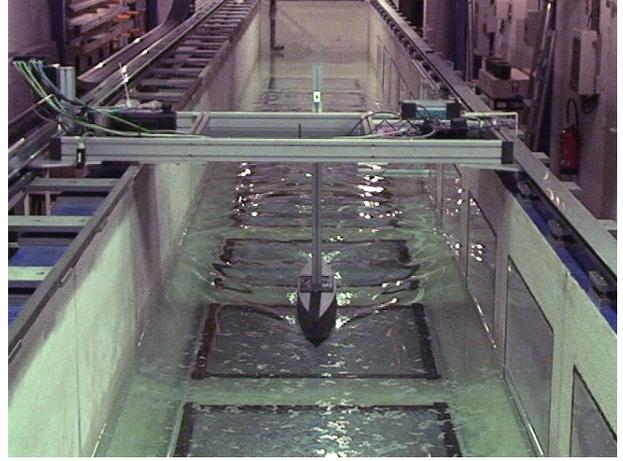


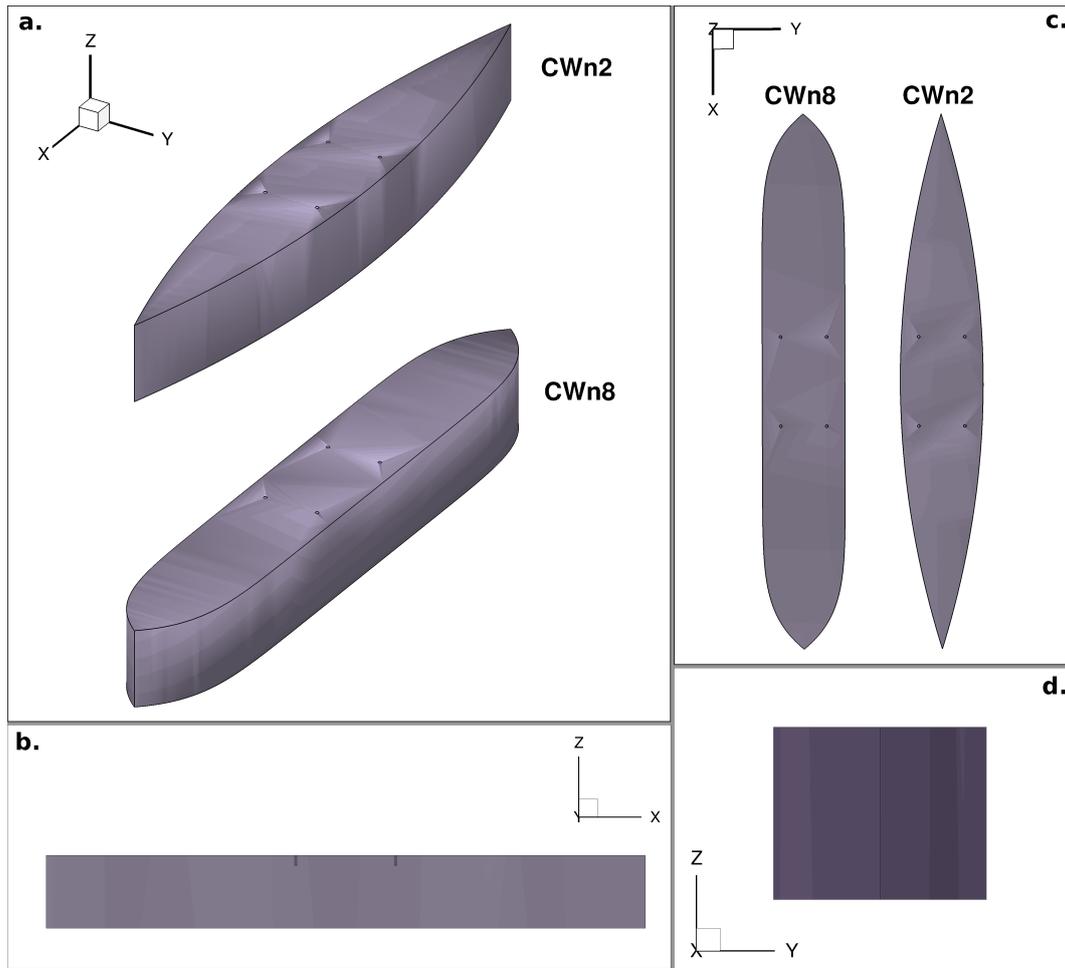
Figure 3 – Vue de face du bassin.

### II – 2 Carènes maritime et fluviale

Les carènes étudiées ici sont deux carènes de forme polynomiale et paramétrables numériquement (Figure 4) basée sur une forme Wigley [3]. Les maquettes sont de dimensions  $L_b$  (longueur du bateau) x  $B$  (maître-bau) x  $D$  (creux) =  $1,2$  x  $0,18$  x  $0,15$   $m^3$  avec un tirant d’eau  $T = 0.075m$ . Dans un premier temps, une carène Wigley à section rectangulaire a été analysée. L’expression de forme pour un Wigley à section rectangulaire est donnée par la formule (1). Cette carène Wigley, notée  $CWn2$  en raison de l’exposant 2 du rapport entre la position axiale  $x$  et la longueur du bateau  $L_b$  a un coefficient de bloc  $Cb = 0.67$ . Les coefficients de bloc des bateaux fluviaux étant plutôt de l’ordre de  $0.8-0.9$ , une autre carène basée sur un Wigley à section rectangulaire, notée  $CWn8$  en raison de l’exposant 8 dans la formule (2), avec un coefficient de bloc  $Cb = 0.89$ , a également été analysée pour étudier l’influence de la géométrie du bateau sur la forme du sillage qu’il génère et sur les amplitudes des ondes de batillage.

$$B_{CWn2}(x) = \frac{B}{2} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{L_b} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$B_{CWn8}(x) = \frac{B}{2} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{L_b} \right)^8 \right] \quad (2)$$



**Figure 4** – Les carènes CWn2 et CWn8 - **a.** Vue en perspective, **b.** Vue de côté, **c.** Vue de dessus, **d.** Vue de face (section rectangulaire).

### II – 3 Méthode de mesure par stéréovision

Les sillages ont été mesurés par une méthode de mesure optique basée sur un principe de stéréovision [1],[2]. Deux caméras Jai RM-4200CL de résolution 2048x2048 pixels, munies d’objectifs Nikkor AF 28mm 1 :2.8 sont placées au dessus du bassin. Les deux caméras visent la même zone avec un angle de  $\pm 15^\circ$  par rapport à l’axe longitudinal du bassin et un angle de  $35^\circ$  par rapport à la verticale. Le champ commun couvert par les caméras forme ainsi un rectangle de 0,90m x 0,75m (demi-largeur du bassin) (Figure 5). L’acquisition des images se fait à une fréquence de 10 images par seconde pendant 20s à l’aide du logiciel Hiris piloté par un boîtier de synchronisation EG de R&D Vision. Les caméras sont préalablement calibrées à l’aide d’une mire bidimensionnelle que l’on déplace. Avant de lancer l’acquisition des images, la surface libre au repos estensemencée de particules flottantes servant de marqueurs et chaque mesure est répétée trois fois. Une fois les images acquises, un programme de corrélation s’appuyant sur la Librairie SLIP [4] traite les couples d’images et permet de calculer à chaque pas de temps la déformée de surface libre avec une résolution spatiale de 10mm et une précision sur la hauteur de 0.1mm (Figure 6). Pour finir, à partir des champs de vagues calculés à chaque pas de temps et pour chaque mesure, une moyenne est effectuée et le sillage est reconstruit spatialement autour de la carène (Figures 10 et 14).

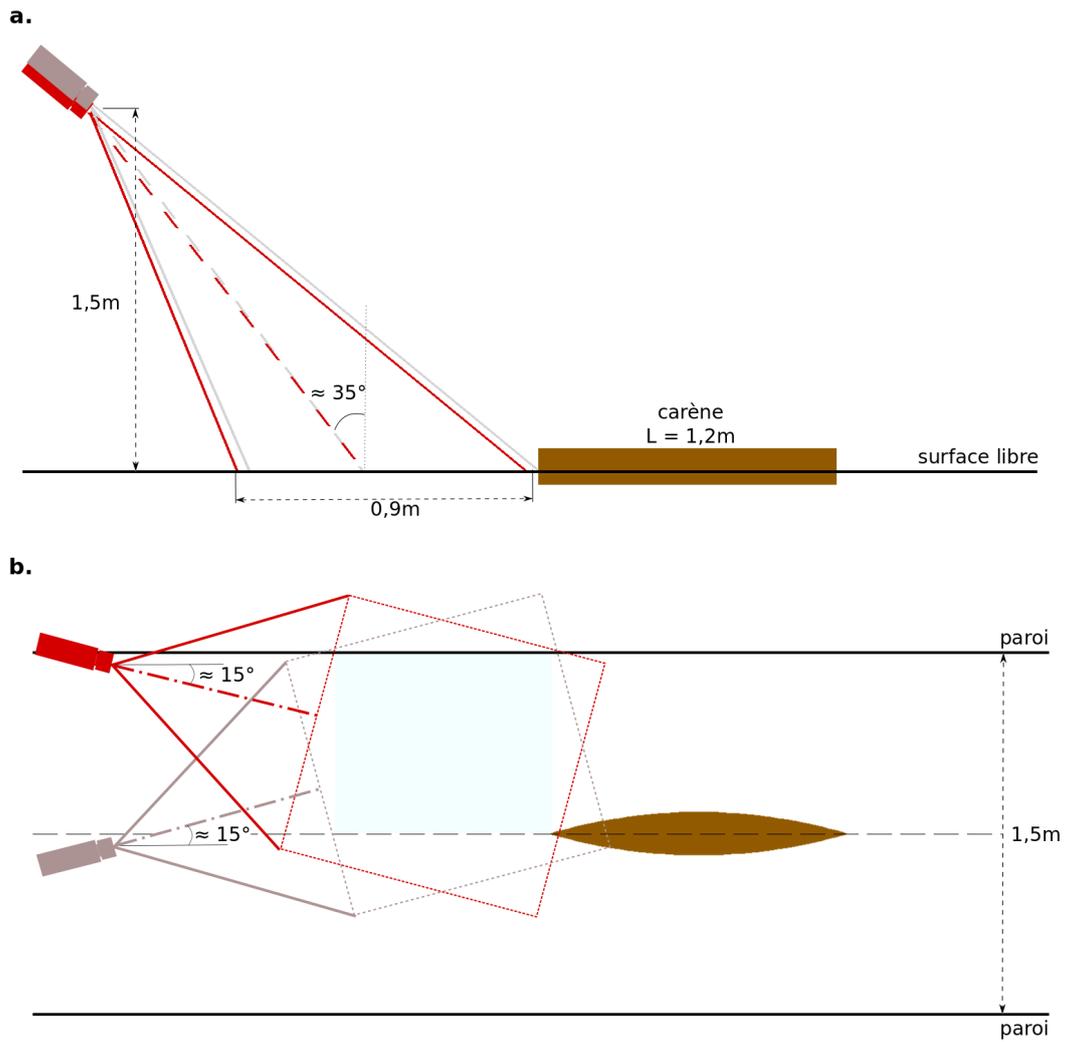


Figure 5 – Schéma du dispositif de stéréovision - **a.** Vue de côté , **b.** Vue de dessus.

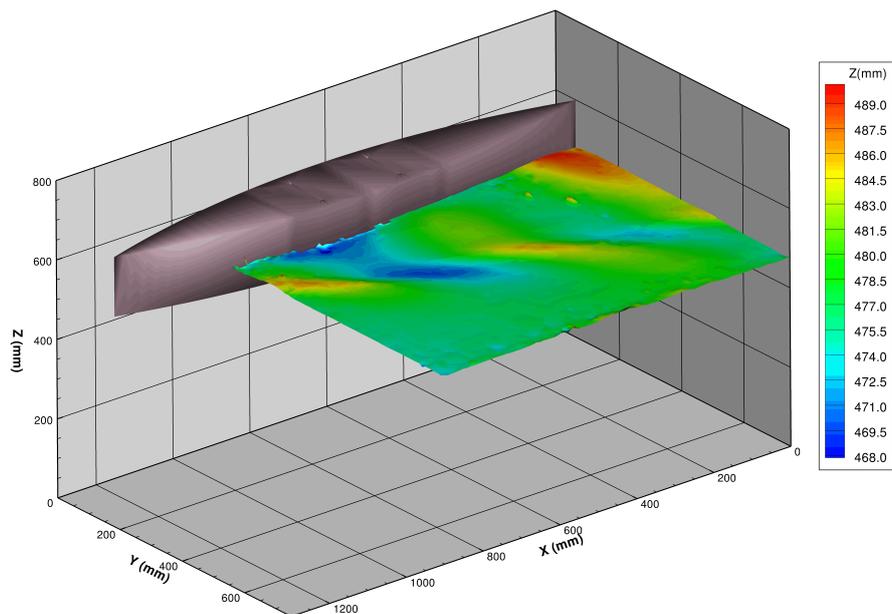


Figure 6 – Déformée de surface libre calculée à partir des corrélations d'un couple d'images.

### III – Matrice d’essais

Pour observer les effets de hauteur d’eau finie sur les sillages, il faut respecter la relation (3) entre la hauteur d’eau  $h(m)$ , la vitesse du bateau  $U(m.s^{-1})$  et la pesanteur  $g(m.s^{-2})$ . Les effets de hauteur d’eau finie se manifestent lorsque  $d^U < d_\infty^U$  avec  $d_\infty^U = 3$ . La hauteur d’eau peut être considérée comme infinie lorsque  $d_\infty^U < d^U$  [5].

$$d^U \equiv \frac{hg}{U^2} < d_\infty^U \quad (3)$$

Pour déterminer l’importance des effets de faible hauteur d’eau par rapport à ceux du confinement latéral, nous nous sommes basés sur une classification du confinement prenant en compte les grandeurs géométriques de la voie d’eau et du bateau, proposée par Voies Navigables de France (Figure 7).

	Confinement modéré	Confinement marqué	Confinement très marqué
$h/T$	15	4	1,5
$W/B$	50 – 200	10 – 15	4
$A_c/A_b$	50	7 – 8	4

**Figure 7** – Classification du confinement selon VNF.  $h$  : hauteur d’eau,  $T$  : tirant d’eau du bateau,  $W$  : largeur de la voie d’eau,  $B$  : maître-bau du bateau,  $A_c$  : section du canal,  $A_b$  : section du bateau.

Nous avons donc fixé les paramètres de nos expériences afin de générer des sillages en configuration de profondeur infinie et en configuration d’eau peu profonde (Figure 8). Les sillages ont été mesurés pour deux vitesses d’avancée du bateau  $U = 0,8m.s^{-1}$  et  $U = 1,2m.s^{-1}$  et pour deux hauteurs d’eau  $h = 48,3cm$  et  $h = 10,3cm$ . Ce choix de paramètres permet en outre de parcourir une large plage de nombres de Froude basés sur la hauteur d’eau, notés  $Fr_h$ . En effet, pour étudier les effets de hauteur d’eau finie sur le sillage et comparer les différentes mesures, il est préférable de considérer un nombre sans dimension tenant compte à la fois de la vitesse du bateau et de la profondeur de la voie d’eau. Les nombres de Froude calculés suivant la hauteur d’eau et suivant la longueur du bateau, respectivement notés  $Fr_h$  et  $Fr_L$ , sont calculés par les formules (4) et (5) :

$$Fr_h = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

$$Fr_L = \frac{U}{\sqrt{gL_b}} \quad (5)$$

<b>h(m)</b>	<b>0,483</b>		<b>0,103</b>	
<b>U(m.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>0,80</b>	<b>1,20</b>	<b>0,80</b>	<b>1,20</b>
$Fr_h$	0,37	0,55	0,80	1,20
$Fr_L$	0,23	0,35	0,23	0,35
$d^U$	7,40	3,29	1,58	0,70
Effets de hauteur d’eau finie	<b>✗</b>	<b>✗</b>	<b>✓</b>	<b>✓</b>
$h/T$	6,44		1,37	
$W/B$	8,33		8,33	
$A_c/A_b$	50		11	
Confinement hauteur	+		+++	
Confinement latéral	++		++	
Confinement section	+		++	

**Figure 8** – Matrice d’essais.

Lors de nos mesures l'effet de hauteur d'eau finie sera prépondérant par rapport à l'effet de confinement latéral qui se traduira par les multiples réflexions du sillage sur les berges. Pour les deux configurations de voie d'eau étudiées, la surface reste au même niveau, le bateau reste fixe, ainsi que les caméras qui couvrent toujours le même champ. La hauteur d'eau est diminuée à l'aide d'un double fond dans le canal (Figure 9).

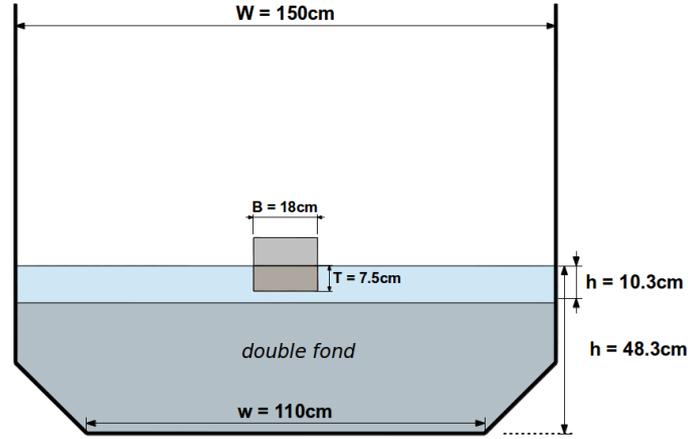


Figure 9 – Section du bassin des carènes.

## IV – Résultats

### IV – 1 Sillages en eau profonde : $h = 48,3\text{cm}$

Les sillages générés en configuration de voie d'eau profonde sont présentés sur la figure 10. Quelle que soit la géométrie du bateau et sa vitesse, nous observons un sillage de Kelvin réfléchi par les parois du canal en raison du confinement latéral. Ce sillage est composé d'un système de vagues transverses et d'un système de vagues divergentes se superposant suivant une ligne appelée caustique. La caustique forme un angle par rapport à la direction d'avancée du bateau, appelé angle de Kelvin et égal à  $19,47^\circ$ . Ce sillage est typique des navires navigant en pleine mer (profondeur "infinie"), pour lesquels il a été récemment démontré que l'angle de Kelvin est constant jusqu'à une vitesse d'avancée correspondant à un nombre de Froude de longueur  $Fr_L = 0,50$  [6]. Lorsque le bateau dépasse cette vitesse limite, l'angle diminue [6],[7]. Lors de nos expériences nous restons en dessous de ce seuil ( $Fr_L = 0,23$  et  $Fr_L = 0,35$ ). Nous pouvons voir de façon géométrique que l'angle  $\beta$  du sillage formé par la carène *CWn2* correspond bien à l'angle de Kelvin de  $19,47^\circ$ , alors que pour la carène *CWn8* cet angle semble légèrement plus grand (pointillés rouges). De plus, le coefficient de bloc plus élevé de la carène *CWn8* induit des amplitudes de vagues plus importantes. Des coupes longitudinales pour  $X \in [-1; 6]m$  suivant trois positions transversales  $Y = 0,25m$ ,  $Y = 0,50m$  et  $Y = 0,70m$  nous mettent en évidence ces amplitudes (Figures 11, 12 et 13). La carène *CWn8* (pointillés) génère des vagues de plus grandes amplitudes, notamment à la position transversale  $Y = 0,70m$ , c'est à dire proche de la paroi. Pour  $U = 0,8m.s^{-1}$  l'amplitude maximale crête à creux générée par la carène *CWn2* (entre  $A^+$  et  $A^-$ ) est  $\Delta_{Z_{max}} = 20mm$  et  $\Delta_{Z_{max}} = 50mm$  pour la carène *CWn8* (entre  $B^+$  et  $B^-$ ), soit une augmentation de +150%. Pour  $U = 1,2m.s^{-1}$  l'amplitude maximale crête à creux générée par la carène *CWn2* (entre  $C^+$  et  $C^-$ ) est  $\Delta_{Z_{max}} = 53mm$  et  $\Delta_{Z_{max}} = 74mm$  pour la carène *CWn8* (entre  $D^+$  et  $D^-$ ), soit une augmentation de +40%. L'impact des vagues générées par la carène *CWn8* sur les parois du bassin est donc plus important. Nous observons également un décalage spatial entre les vagues générées par les deux carènes mais la longueur d'onde reste la même.

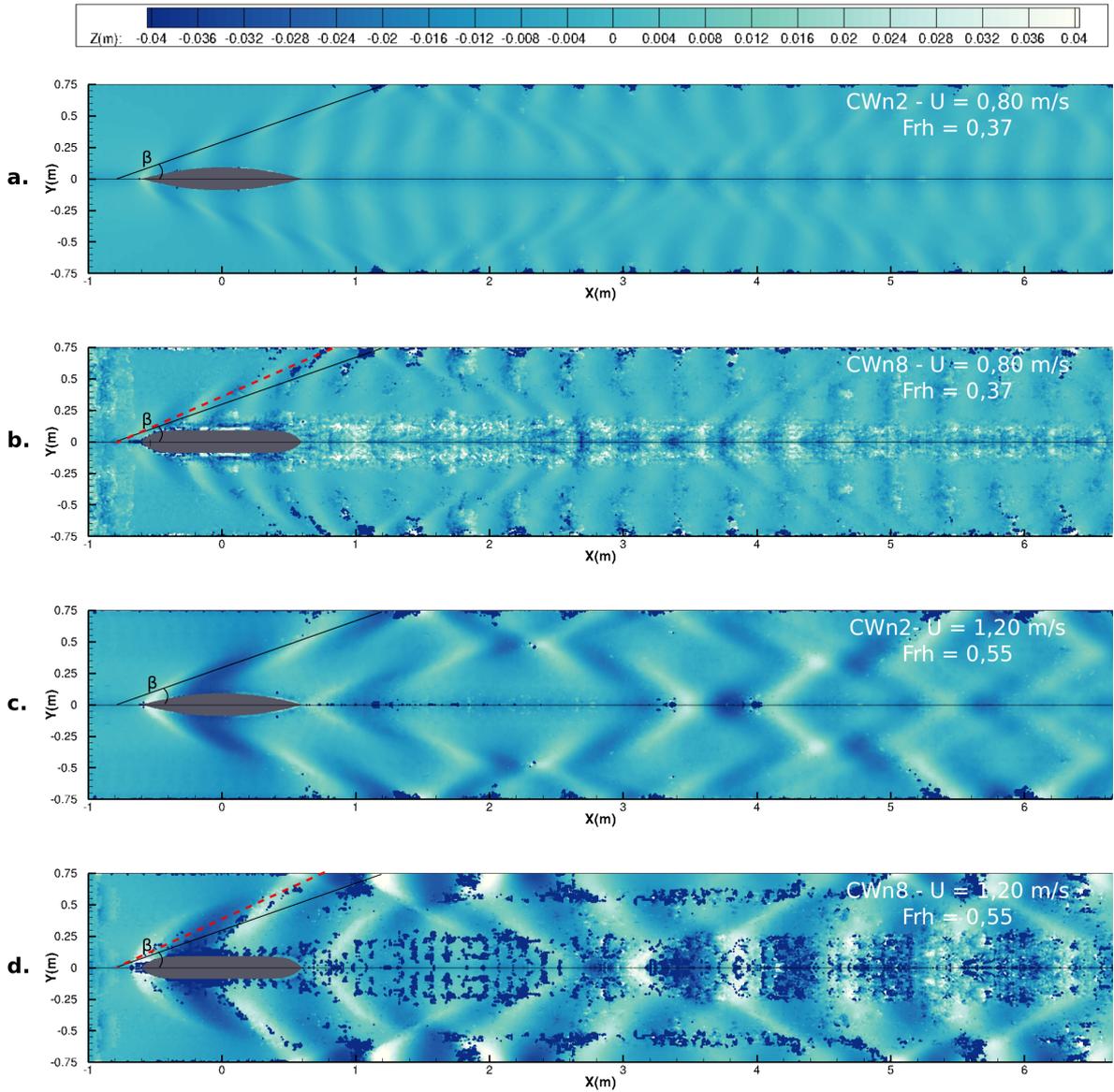


Figure 10 – Sillages mesurés autour des carènes *CWn2* (a,c) et *CWn8* (b,d) en eau profonde.

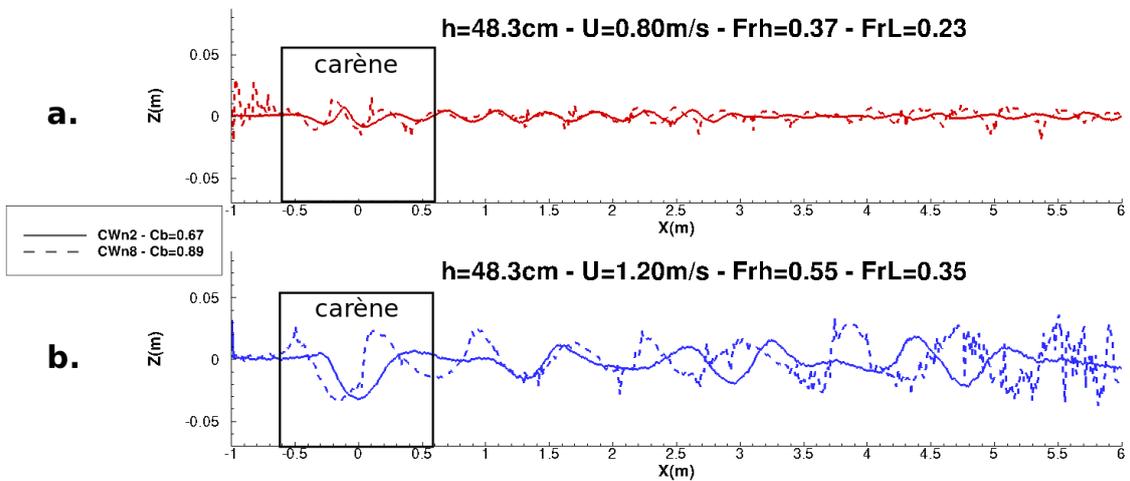


Figure 11 – Coupe longitudinale à  $Y = 0,25m$  - a.  $U = 0,8m.s^{-1}$ , b.  $U = 1,2m.s^{-1}$

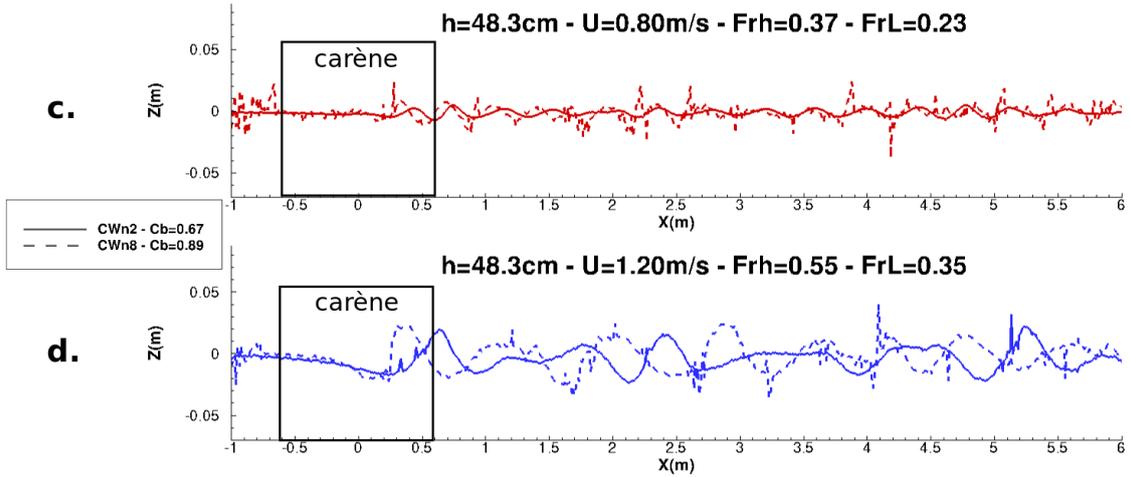


Figure 12 – Coupe longitudinale à  $Y = 0,50m$  - **c.**  $U = 0,8m.s^{-1}$  , **d.**  $U = 1,2m.s^{-1}$

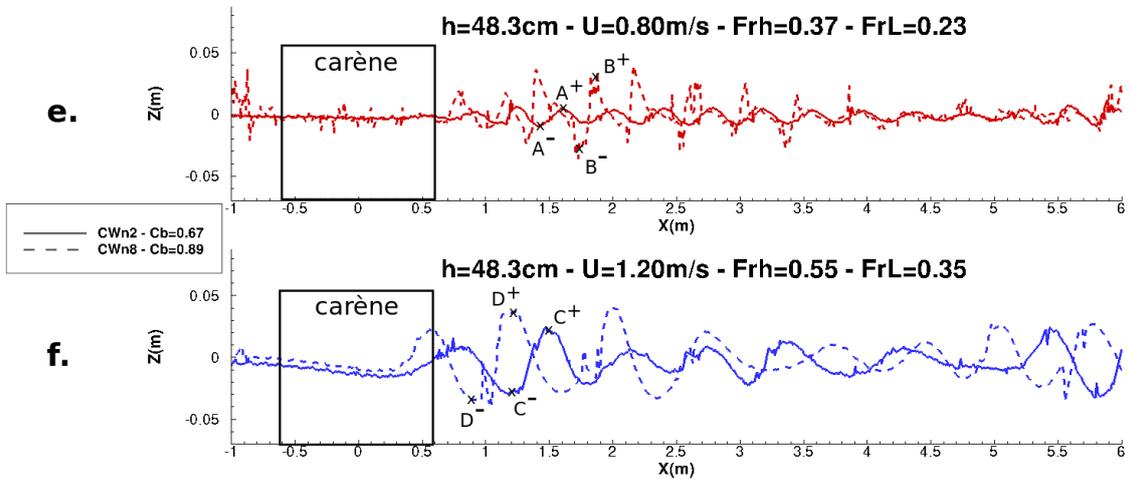


Figure 13 – Coupe longitudinale à  $Y = 0,70m$  - **e.**  $U = 0,8m.s^{-1}$  , **f.**  $U = 1,2m.s^{-1}$

#### IV – 2 Sillages en eau peu profonde : $h = 10,3cm$

Les sillages générés en configuration de voie d'eau peu profonde sont différents des sillages en eau profonde vus précédemment. A une vitesse  $U = 1,2m.s^{-1}$  (Figure 14 **c.** et **d.**) nous observons un sillage supercritique ( $Fr_h > 1$ ), pour lequel nous pouvons faire l'analogie avec le cône de Mach en régime aérodynamique supersonique. En effet, ce sillage n'est composé que d'ondes divergentes. A l'inverse, pour une vitesse  $U = 0,8m.s^{-1}$  (Figure 14 **a.** et **b.**) le sillage n'est composé que d'ondes transverses. Ce sillage est similaire aux sillages observés par John Scott Russell au XIXème siècle lors de ses expériences dans des canaux [8]. Ses travaux précurseurs ont clairement mis en évidence les effets de hauteur d'eau finie sur les sillages des navires en canaux, notamment l'abaissement du plan d'eau autour de la carène et la génération d'une forme particulière de vague d'étrave perpendiculaire au sens d'avancée du navire, couramment appelée "bourrelet de proue". Ces deux phénomènes se manifestent sur les sillages mesurés, quelle que soit la vitesse et la forme du bateau. Nous remarquons une élévation du niveau d'eau à l'avant du bateau (pour  $X \in [-1; -0.5]m$ ) et les creux autour de la carène (bleu foncé) sont d'amplitudes plus importantes qu'en configuration de voie d'eau profonde. Les coupes longitudinales pour  $X \in [-1; 6]m$  suivant trois positions transversales  $Y = 0,25m$ ,  $Y = 0,50m$  et

$Y = 0,70m$  (Figures 15, 16 et 17) montrent que les amplitudes du bourrelet de poue sont de l'ordre de  $1cm$  pour la vitesse  $U = 0,8m.s^{-1}$  et de  $4cm$  pour la vitesse  $U = 1,2m.s^{-1}$ . Nous voyons également que l'abaissement du plan d'eau autour de la carène (représentée par le rectangle noir) est plus important à  $U = 0,8m.s^{-1}$  (environ  $4cm$  de creux) qu'à  $U = 1,2m.s^{-1}$  (environ  $2cm$  de creux) et qu'il s'étend jusqu'aux parois du canal ( $Y = 0,70m$ ). Le bourrelet de poue généré à l'avant de la carène est à l'origine de l'augmentation de la résistance à l'avancement auxquels sont confrontés les bateaux navigant en milieu confiné. L'abaissement du plan d'eau auquel se rajoute la réflexion des vagues du sillage sur les parois, renforce l'impact des ondes de batillage sur les berges et aggrave leur érosion. Pour finir nous observons, comme en configuration de profondeur infinie, un phénomène de décalage spatial entre les vagues générées par les deux carènes.

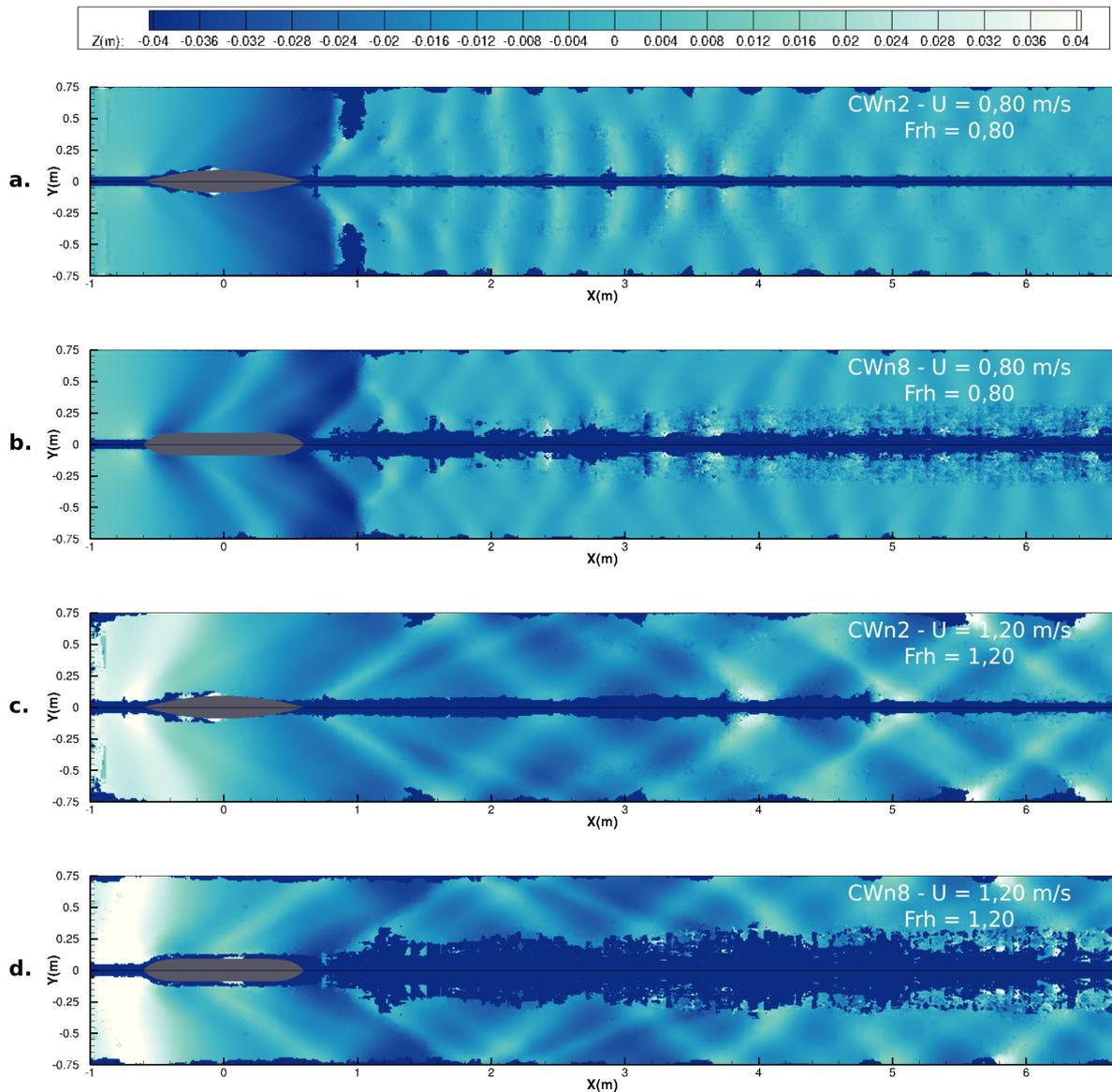


Figure 14 – Sillages mesurés autour des carènes  $CWn2$  (a,c) et  $CWn8$  (b,d) en eau peu profonde.

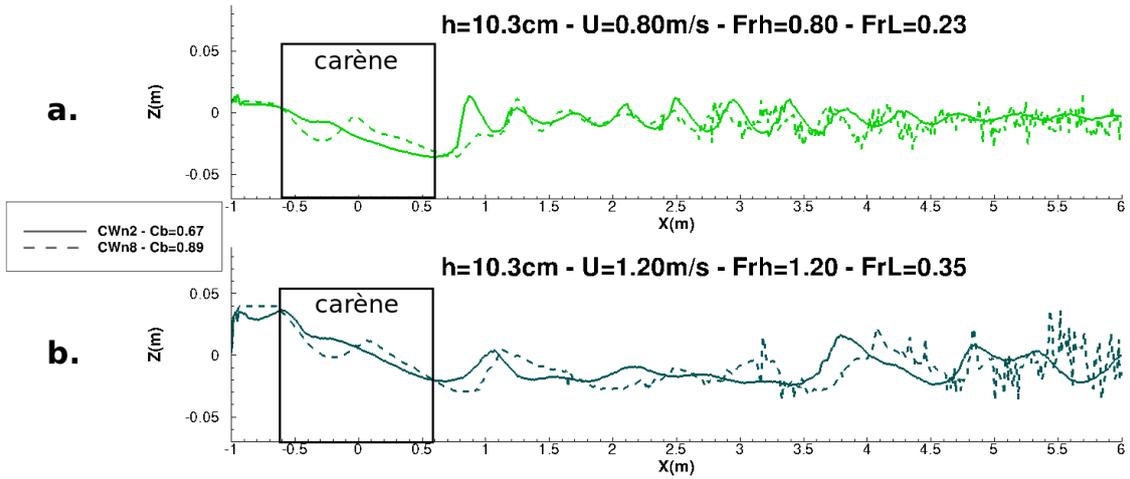


Figure 15 – Coupe longitudinale à  $Y = 0,25m$  - a.  $U = 0,8m.s^{-1}$  , b.  $U = 1,2m.s^{-1}$

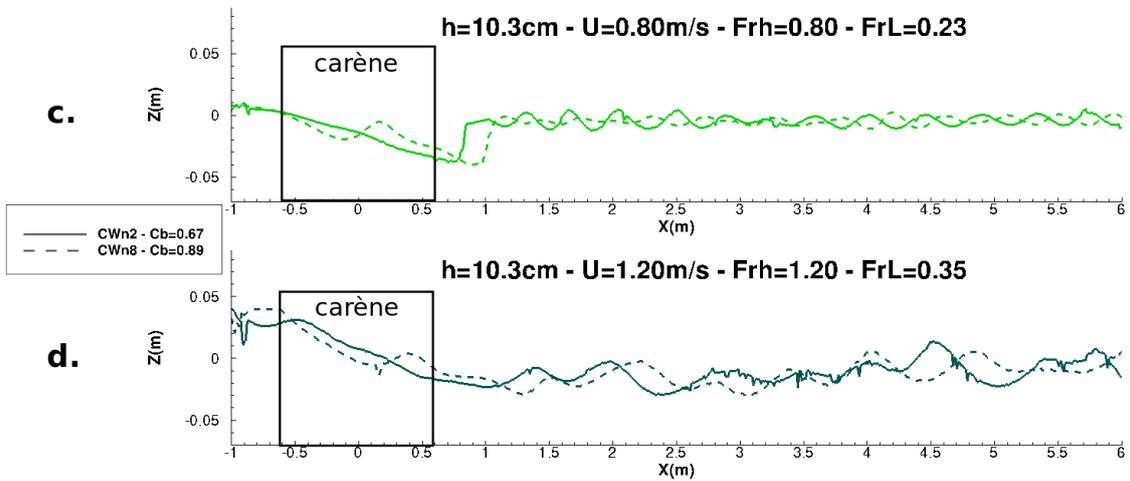


Figure 16 – Coupe longitudinale à  $Y = 0,50m$  - c.  $U = 0,8m.s^{-1}$  , d.  $U = 1,2m.s^{-1}$

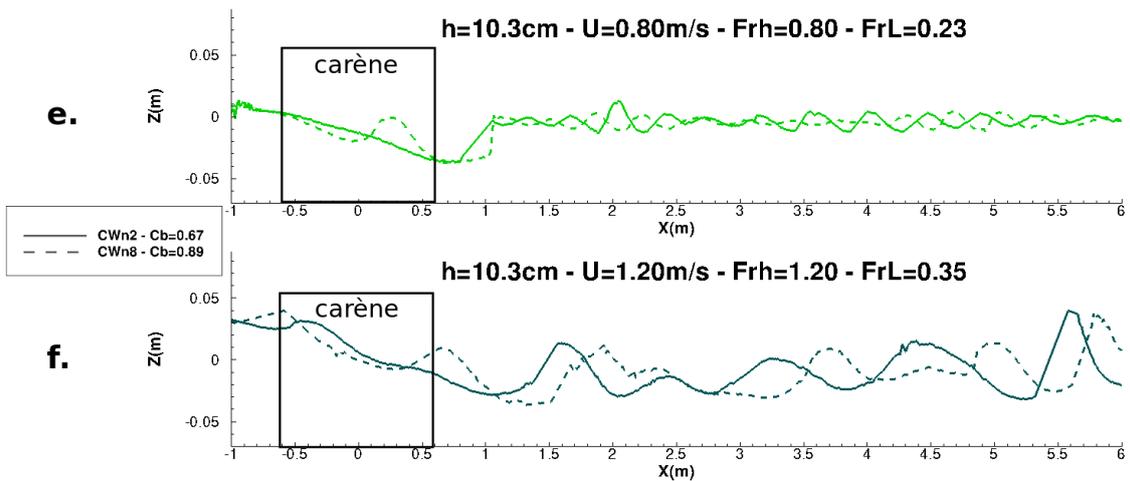


Figure 17 – Coupe longitudinale à  $Y = 0,70m$  - e.  $U = 0,8m.s^{-1}$  , f.  $U = 1,2m.s^{-1}$

## V – Conclusion et perspectives de travail

Cette étude expérimentale a permis de mesurer des sillages de navires pour différentes configurations de voie d'eau et différentes géométries de bateau. Plusieurs types de sillage ont été identifiés. Une première analyse des sillages a permis de mettre en évidence l'effet du coefficient de bloc du bateau sur l'amplitude des vagues générées en eau profonde. En configuration de voie d'eau peu profonde, le bourrelet de proue et l'abaissement du plan d'eau autour de la carène, qui sont des effets principaux de la navigation en milieu confiné, ont été observés et quantifiés. La technique de mesure par stéréovision permettant une reconstruction fine et précise du champ de vague, une analyse spectrale des sillages mesurés permettra de mesurer précisément l'angle de la caustique. En outre, des visualisations de côté des amplitudes des vagues du sillage pour les mêmes configurations de voie d'eau et pour une gamme de vitesse plus élargie, permettront d'étudier l'évolution de l'amplitude du bourrelet de proue, des vagues du sillage au niveau de la paroi et de l'abaissement du plan d'eau en fonction de la vitesse du bateau. En parallèle, des mesures de résistance à l'avancement du bateau avec un dynamomètre donneront accès aux courbes de résistance pour ces différentes configurations. Ainsi il sera possible d'étudier l'influence des paramètres géométriques de la voie d'eau et du bateau sur la résistance à l'avancement.

### Références

- [1] L. CHATELLIER, S. JARNY, F. GIBOUIN et L. DAVID : Stereoscopic measurement of free surface flows. *14th International Conference on Experimental Mechanics, Poitiers, France*, 6, 2010.
- [2] G. GOMIT, D. CALLUAUD, L. CHATELLIER, L. DAVID et D. FRECHOU : Développement et applications de techniques de mesures optiques pour l'analyse de sillages de navire en bassin des carènes. *13èmes Journées de l'Hydrodynamique, Chatou, France*, 2012.
- [3] W. C. S. WIGLEY : Ship wave resistance. A comparison of mathematical theory with experimental results. *Spring Meetings of the 67th Session of the Institution of Naval Architects*, XIV:124–141, Mars 1926.
- [4] B. TREMBLAIS et L. DAVID : Logiciel Standard Library for Image Processing. *Licence CECILL DL 03685-01*, 2010.
- [5] Y. ZHU, J. HE, C. ZHANG, H. WU, D. WAN, R. ZHU et F. NOBLESSE : Farfield waves created by a monohull ship in shallow water. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2014.
- [6] M. RABAUD et F. MOISY : Ship wakes : Kelvin or mach angle? *Phys. Rev. Lett.*, 110:214503, May 2013.
- [7] F. NOBLESSE, J. HE, Y. ZHU, L. HONG, C. ZHANG, R. ZHU et C. YANG : Why can ship wakes appear narrower than Kelvin's angle? *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 46(0):164 – 171, 2014.
- [8] J. SCOTT RUSSELL : Mr Scott Russell's Researches in Hydrodynamics. *Transactions of the Edinburgh Royal Society*, XIV:47–109, 1840.