

# Rapport Seine-Aval 4



## IBIS Investigation du Batillage en Seine



Deloffre J., Lafite R., Blanpain O., Fournier M., Simon M.,  
Lemoine M., Mesquita J., Calluau D., David L., Gomit G.



Mars 2012



GIP Seine-Aval  
Pôle Régional des Savoirs  
115 Bd de l'Europe  
76 100 - Rouen

tel : 02 35 08 37 64  
<http://www.seine-aval.fr>



## Rapport Scientifique Seine-Aval



**Responsables** : J. Deloffre, R. Lafite.

**Liste des participants** :

UMR CNRS 6143 : R. Lafite, J. Deloffre, O. Blanpain, M. Fournier, M. Simon, M. Lemoine, J. Mesquita.

Institut P' : D. Calluau, L. David, G. Gomit.



# Sommaire

I.	Introduction .....	5
II.	Zone géographique concernée .....	7
	2.1. Morphologie du site de Bardouville .....	8
	2.2. Carte des sédiments de surface de zone intertidale .....	10
	2.3. Hydrodynamique de la Zone de Bardouville .....	5
	2.4. Evolution temporelle du site de Bardouville .....	6
	2.5. Le site de Petiville .....	7
III.	Résultats scientifiques .....	11
	3.1. Méthodologie de la mesure de Terrain .....	11
	3.2. Relation caractéristiques des navires et ondes mesurées sur la zone intertidale. ....	13
	3.3. Quantification l'impact des vagues de batillage sur le transport sédimentaire en zone intertidale .....	22
	3.4. Comparaison : rôle du batillage sur la vasière de Petiville .....	27
	3.5. Outils expérimentaux .....	28
	3.5.1 Le bassin des carènes.....	28
	3.5.2 Le bateau.....	29
	3.5.3 Caractérisation de l'écoulement généré par le passage d'un bateau .....	34
	3.5.4 Influence des paramètres étudiés .....	46
	4. Retombées Opérationnelles directes et/ou indirectes du projet .....	54
	Conclusion & Perspectives .....	55
	Bibliographie.....	57
	Annexe: Communication à « 34rd IAHR Biennial Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment », Bisbanne, Australie : congrès international avec actes et comité de lecture .....	59

# I. Introduction

En raison des faibles profondeurs d'eau dans les zones littorales et estuariennes, les vagues interagissent directement avec les sédiments de surface et peuvent induire l'érosion du sédiment entraînant une augmentation de la concentration en particules en suspension. Les conséquences de ce type de mécanismes sont variées : augmentation de la turbidité de l'eau et de la sédimentation, libération d'éléments nutritifs (e.g. phosphore et azote) et de contaminants, nuisances aux usagers et aux infrastructures, en générant des dépenses de maintenance très importantes (Bouchard, 1983 ; Varyani, 2006 ; Rapaglia et al., 2011). Par ailleurs, ce phénomène menace l'intégrité et la pérennité d'habitats de valeur écologique et peut entraîner des pertes importantes de productivité au niveau des communautés animales et végétales (Dauphin, 2000). Les ondes de surface, intensifiées par le sillage des bateaux, et leurs interactions avec les sédiments et les organismes benthiques sont les principaux processus hydrodynamiques affectant les écosystèmes littoraux (Hofmann et al., 2008), en particulier dans les zones peu profondes et fermées (Macfarlane et Renilson, 1999). Dans le cadre de projets de restauration, le profil et la hauteur des berges, les conditions de stabilité de berges re-végétalisées ou la mise en place d'aménagements récréatifs sont conditionnés à la connaissance de l'ampleur et de la fréquence de ce phénomène de batillage. Enfin, les projets de récréation d'habitats biologiques nécessitent également de bien comprendre les principaux facteurs de déstructuration des berges afin de les préserver.

La densification du trafic côtier et fluvial, l'accroissement de la puissance des navires (Nanson *et al.*, 1994) entraînent une augmentation de vitesse et du jet de rive associé, amplifiant le phénomène d'érosion. La densification du trafic des navires dans des zones devenues touristiques a modifié significativement la dynamique sédimentaire des plages en créant des vagues de caractéristiques différentes par rapport aux vagues de vent (Velegrakis et al., 2006 ; Verney et al., 2006). Bien que les études quantitatives sur les processus naturels d'érosion des rives soient nombreuses, les caractéristiques des vagues et des sédiments contrôlant ces taux d'érosion quand les rives sont exposées au passage des bateaux, restent largement mal connues (Nanson et al., 1994 ; Rapaglia et al., 2011). La compréhension de leurs caractéristiques est indispensable dans le but de quantifier et de réduire leurs effets. Cette connaissance s'avère utile pour développer des techniques de protection des berges (Dorava et Moore, 1997) et des fonds efficaces, établir des limites de vitesse, surveiller l'érosion des rives (MacFarlane et Renilson, 1999).

De nombreuses études, se sont intéressées aux ondes de batillage, par le biais d'une approche de mesures (Velegrakis et al., 2006 ; Hugues et al., 2007 ; Rapaglia et al., 2011), ou d'une approche expérimentale et de modélisation (Sanford et al., 1994 ; Molland et al., 2002 ; Varyani, 2006). Ces études se sont concentrées soit sur la mesure de l'onde de batillage (élévation de la surface libre liée du train d'onde, modification des vitesses de courant) ou sur la mesure de l'érosion des berges. En raison de la déstructuration des berges, ces études se sont principalement focalisées sur des canaux de navigations fluviales, à l'exception de l'impact des ferry sur la zone côtière (Rapaglia et al., 2011). L'ensemble de ces mesures démontre qu'il est complexe de mettre en place des lois généralisables car le phénomène de batillage et l'érosion associée est la résultant de deux ensembles de paramètres : les facteurs liés au navire (vitesse, direction, forme de la coque, nombre d'hélices, la charge, l'assiette...) et les facteurs environnementaux (bathymétrie, marnage, direction et vitesse des courants de marée, la morphologie des côtes, la granulométrie...).

En estuaire de Seine, au cours du siècle dernier, les autorités portuaires ont mis l'accent sur la facilitation des échanges économiques par le biais de l'aménagement de digues (80% des digues sont aménagées entre Poses et Tancarville) et de l'augmentation de l'activité de dragage (Foussard, 2009). Ces évolutions ont conduit à permettre et à sécuriser le trafic des navires maritimes dans l'estuaire de la Seine : le port de Rouen est susceptible

d'accueillir 80% de la flotte mondiale. Ces aménagements ont également entraîné une modification de l'hydrodynamique de l'estuaire et du transport sédimentaire. A l'heure actuelle, les autorités portuaires se sont engagées dans une politique de réhabilitation des berges et de ses annexes hydrauliques dans le cadre du programme « Rouen Port Maritime ». Une des particularités de l'estuaire de la Seine est de permettre le trafic de navires de gabarits et de forme extrêmement variable, faisant de cet estuaire un site unique pour l'étude du batillage. L'objectif du programme IBIS (Investigation du Batillage en Seine) est d'améliorer la connaissance de l'effet du batillage sur les zones intertidales de l'estuaire de Seine. L'étude se focalise plus précisément sur les relations entre d'une part les paramètres des navires et les caractéristiques du système estuarien et les trains d'onde de batillage générées par les navires d'autre part. Le second objectif du programme est de quantifier l'impact des vagues de batillage sur le transport sédimentaire en zone intertidale. Afin d'atteindre ces objectifs, une approche par des mesures de terrain sur les sites ateliers de future restauration est proposée, couplée à une approche expérimentale.



## II. Zone géographique concernée

Le trafic maritime le long de l'estuaire de la Seine peut être divisé en deux grands ensembles :

- du barrage de Poses à Rouen, le trafic est limité aux bateaux fluviaux de type barges, pousseurs, péniches...
- en aval de Rouen, le trafic est composé de navires fluviaux, fluvio-maritimes et maritimes.

L'impact du batillage a fait l'objet d'une étude préliminaire dans la zone fluviale de l'estuaire de la Seine, en amont du port de Rouen (Verney et al., 2007). Cette étude menée sur une zone intertidale vaso-sableuse a permis de quantifier l'impact des barges sur la remise en suspension des sédiments intertidaux cohésifs. La présente étude se concentre principalement sur un site intertidal sableux de l'estuaire de Seine : le site de Bardouville (pk 268), en aval de Rouen (Fig. 1). Cette zone intertidale (d'une superficie de 40000m<sup>2</sup>), localisée en rive gauche, est soumise à l'influence de la marée dynamique et du débit fluvial.

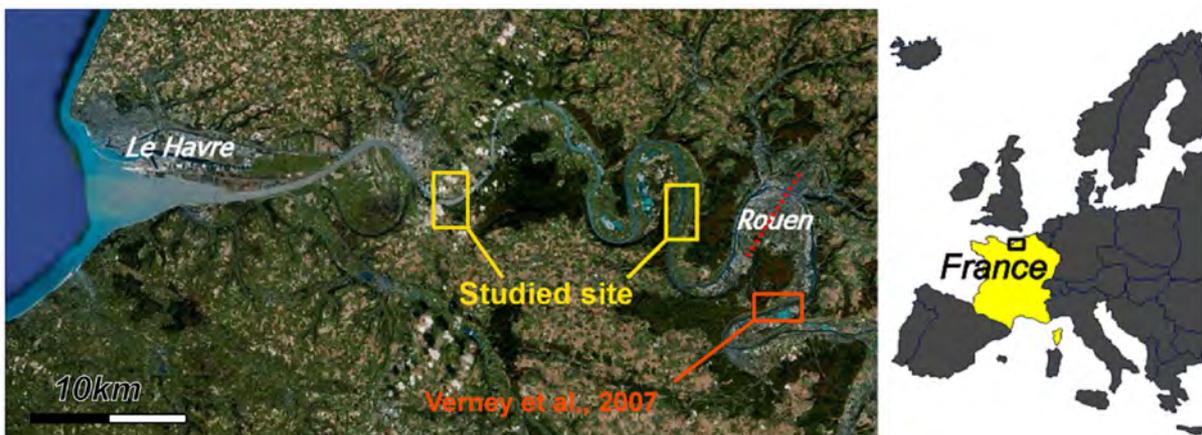


Figure 1 : Localisation des sites d'étude du programme IBIS

Le choix de ce site a été conditionné par (i) la variété des faciès sédimentaires (Fig. 2), (ii) la présence de végétation dans la partie haute de l'estran et (iii) le fait que les terrains adjacents soient la propriété du Grand Port Maritime de Rouen (GPMR) permettant d'envisager des scénarii de restauration sur ce site (Fig. 2).



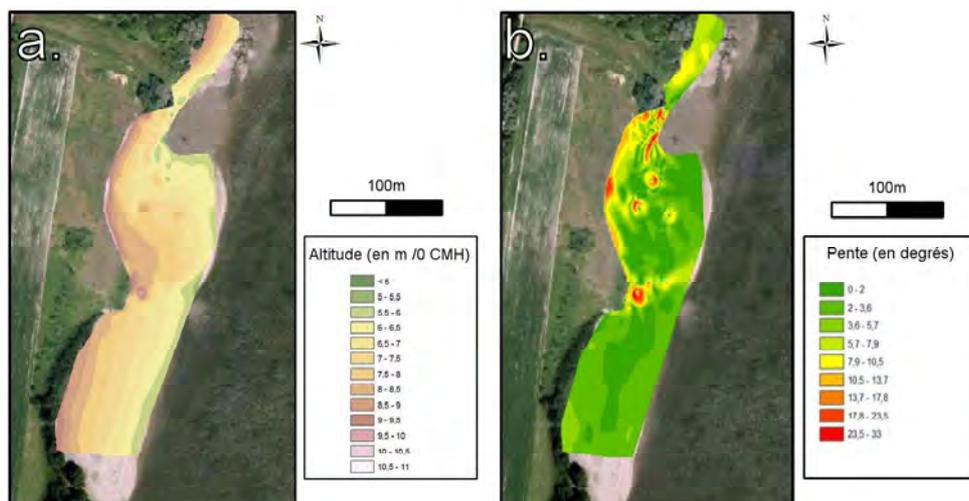
Figure 2 : Faciès sédimentaires de la zone intertidale de Bardouville (photos : O. Blanpain).

a. Zone haute de l'estran ; b. Chambre de dépôt, vase relique et faciès grossier ;  
c. Zone sable de l'estran ; d. zone envasée (vase fluide).

La première étape du programme a été de caractériser la morphologie, la couverture sédimentaire et l'hydrodynamique sur le site de Bardouville.

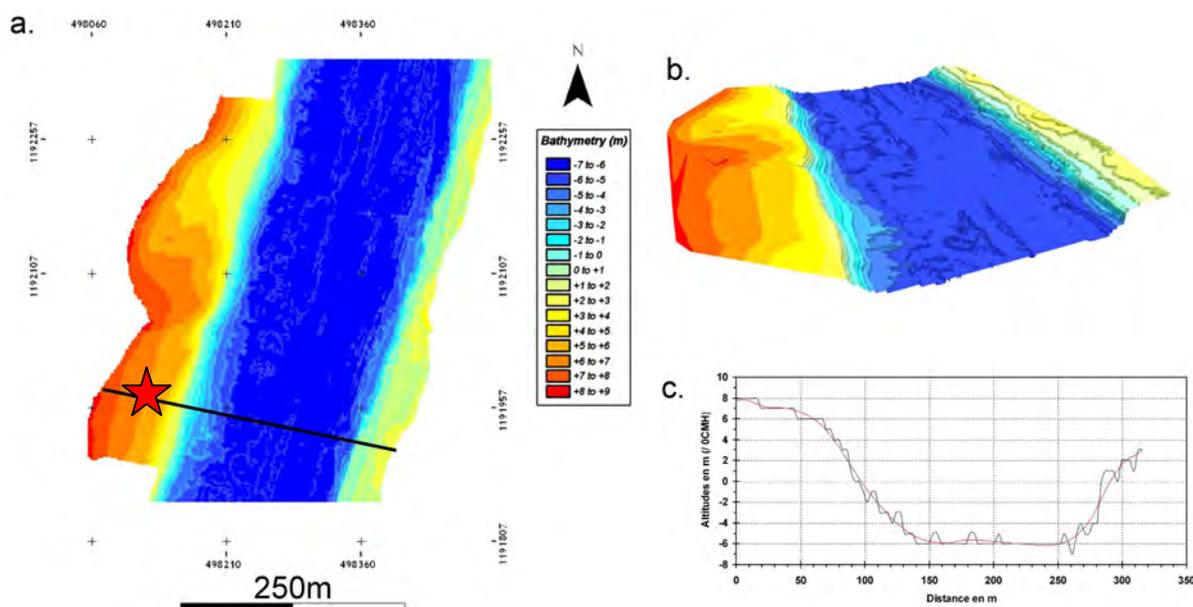
## 2.1. Morphologie du site de Bardouville

La morphologie du site de Bardouville a été obtenue par l'interpolation des données de bathymétrie dans le chenal de Seine acquises à l'aide d'un sondeur multifaisceaux (données GPMR) et des données de topographie acquises grâce à un tachéomètre laser. Cette topographie de la zone intertidale a été effectuée par l'acquisition de 335 points sur l'estran en Février 2009 (Fig. 3). Les données ont été recalées en altitude IGN, à l'aide d'une triangulation de 3 points d'altitude connue. Les données ont été importées sous le logiciel ESRI-Arcgis®, le choix de l'interpolation s'est portée sur une méthode de type spline, permettant d'offrir une vision globale en limitant les artefacts (Lemoine, 2010).



*Figure 3 : Topographie de la zone intertidale de Bardouville : a. carte des altitudes (m/OCMH) et b. carte des pentes (en degrés).*

Les données de bathymétrie par sondeur multifaisceaux ont été fournies par le GPMR dans le secteur compris entre le pk267 et le pk269. Ces données ont été acquises en Août 2008 avec une résolution de l'ordre de 1 point/10cm. Le traitement de ces données sous logiciel SIG est similaire à celui présenté pour la topographie de la zone intertidale (Fig. 4).



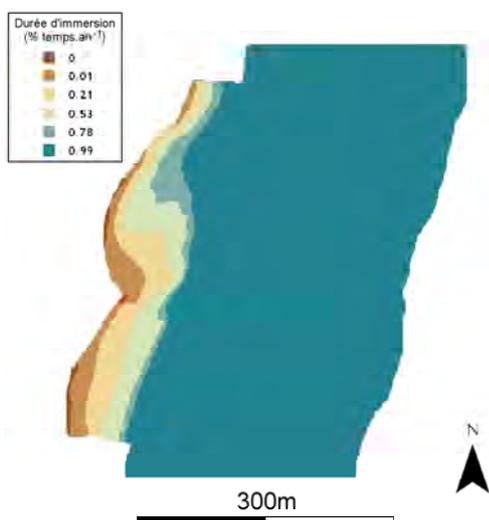
*Figure 4 : Assemblage des données topographiques (M2C) et bathymétriques (GPMR) de la zone de Bardouville : a. carte topographique ; b. visualisation 3D de la zone (exagération verticale \*2) et c. exemple de profil bathymétrique (localisation sur la fig. 4a).*

Le couplage des données bathymétriques et des données de hauteurs d'eau acquises par le marégraphe de Mesnil sous Jumièges (pk 284) permet de calculer les temps d'immersion de la zone intertidale de Bardouville. Cette donnée est essentielle dans le traitement des données concernant la végétation. Les données marégraphiques utilisées correspondent à l'année hydrologique 2003-2004, année moyenne d'un point de vue du cycle hydrologique (Tableau A).

Hauteur minimum	1er quartile	Hauteur médiane	3ème Quartile	Hauteur Moyenne	Hauteur maximum
3.67	5.19	6.10	6.89	6.06	9.03

**Tableau A : Distribution des hauteurs d'eau (en m/0CMH) au marégraphe de Mesnil sous Jumièges au cours du cycle hydrologique 2003-2004.**

La durée de l'immersion (calculé en % de temps.an<sup>-1</sup>) sur la zone de Bardouville est présentée sur la figure 5. Cette figure montre que la durée de l'immersion sur la partie haute de l'estran est très faible (<1% de l'année) et s'effectue uniquement en période de pic de crue combiné à un coefficient de marée important, ce qui permet l'installation de végétation, incluant des arborés.



**Figure 5 : Durée des temps d'immersion sur la zone de Bardouville.**

L'une des particularités du site intertidal de Bardouville est une évolution rapide de la morphologie de surface et de la couverture sédimentaire. Les suivis de terrain montrent que les évolutions de la morphologie se produisent sur des pas de temps courts (d'une marée à l'autre). La surface peut être plane avec présence ou non de plaquages vaseux, ridée (avec différents types de rides). La surface peut également présenter des blocs millimétriques à pluri centimétriques déposés dans la partie basse de l'estran (Fig. 2c et Fig. 6)



**Figure 6 : Evolution de la morphologie et de la couverture sédimentaire de l'estran de Bardouville (Photos : O. Blanpain)**

## **2.2. Carte des sédiments de surface de zone intertidale de Bardouville**

La carte de la couverture sédimentaire de la zone intertidale de Bardouville a été effectuée grâce au prélèvement de 110 échantillons de surface (1<sup>er</sup> cm) en 2009. Les sédiments ont ensuite été séchés à l'étuve puis tamisés. Cette technique permet de déterminer les proportions de graviers (>2000 $\mu$ m), sable (63 à 2000 $\mu$ m) et de silts-argile (<63 $\mu$ m). Pour chaque échantillon, les paramètres granulométriques ont été calculés suivant les formules de Folk et Ward (1957). Les cartes sédimentaires reportées sur la figure 7, montrent la diversité des faciès sédimentaires présents sur l'estran de Bardouville. De plus, la partie Sud de la zone (zone de référence) présente un gradient granulométrique des sables : les sables les plus fins se situent dans la partie basse de l'estran et sont progressivement remplacés par des sables plus grossiers dans la partie haute.

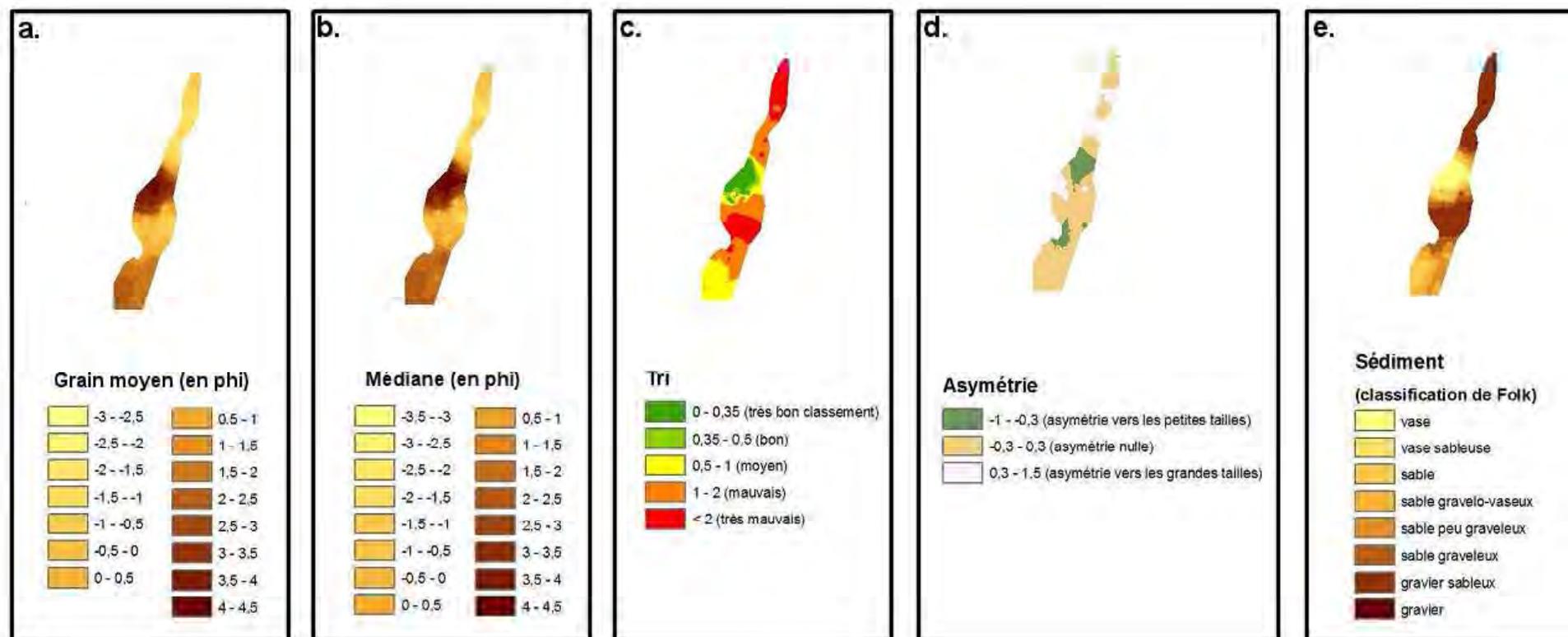
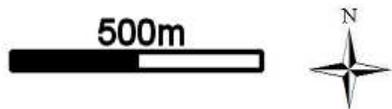
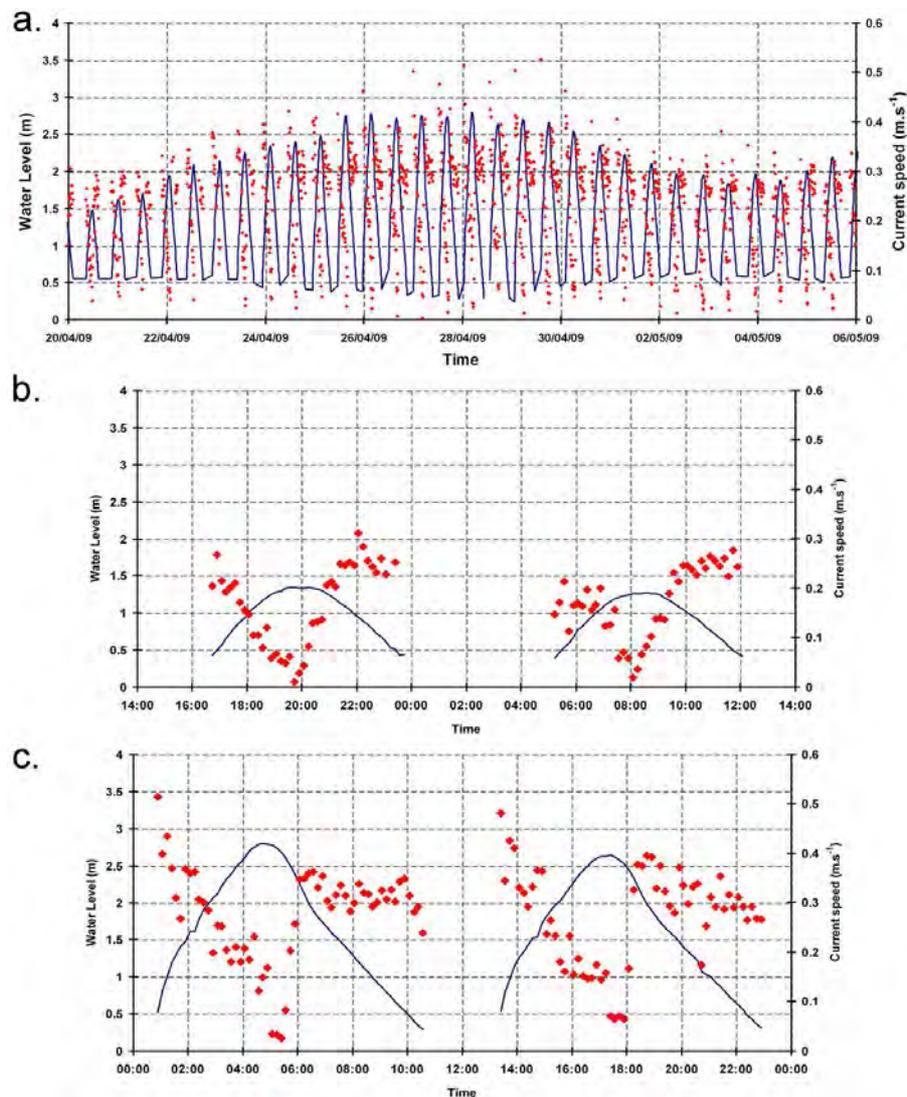


Figure 7 : Distribution des sédiments de surface de la zone intertidale de Bardouville :  
 a. Grain moyen ; b. Médiane ; c. Tri ; d. Asymétrie et e. Répartition des sédiments de surface.

## 2.3. Hydrodynamique de la Zone de Bardouville

Les vitesses de courant ont été préalablement mesurées sur le site intertidal de Bardouville grâce à deux ADV (Aquadopp NORTEK) enregistrant les vitesses de courant à une fréquence de 1 mesure.mn<sup>-1</sup>. Le premier ADV a été positionné en partie basse de l'estran (site de référence, cf. Fig. 9). Dans cette zone d'eau douce, la marée dynamique s'exprime avec des hauteurs d'eau maximum variant de 1.5 à 2.8m et des vitesses de courant maximum variant de 0.3m.s<sup>-1</sup> à 0.6m.s<sup>-1</sup> (Fig. 8a), respectivement en période de morte-eau (Fig. 8b) et en période de vive-eau (Fig. 8c). Dans cette partie de l'estuaire, l'asymétrie de marée est particulièrement marquée en vive eau (Fig. 8c). La fréquence de mesure utilisée ne permet pas d'enregistrer les variations de surface libre et de courant lié au passage de bateaux.



*Figure 8 : Vitesses de courant sur le site de référence de Bardouville : a. Echelle du cycle semi-lunaire ; b. Cycle de marée semi diurne en morte-eau et c. Cycle de marée semi diurne en vive-eau*

Le second ADV a été déplacé en différents points de l'estran de Bardouville afin d'obtenir une couverture de la courantométrie de l'ensemble de la zone d'étude. Les hodographes montrent que les vitesses de courant sont plus élevées dans la partie basse de l'estran comparativement à la partie haute le long d'un transect cross-

shore, jusqu'à atteindre des vitesses quasi-nulles (Fig. 9). De plus, les vitesses de courant en période de vive eau sont toujours supérieures en flot qu'en jusant en lien avec l'asymétrie de marée.

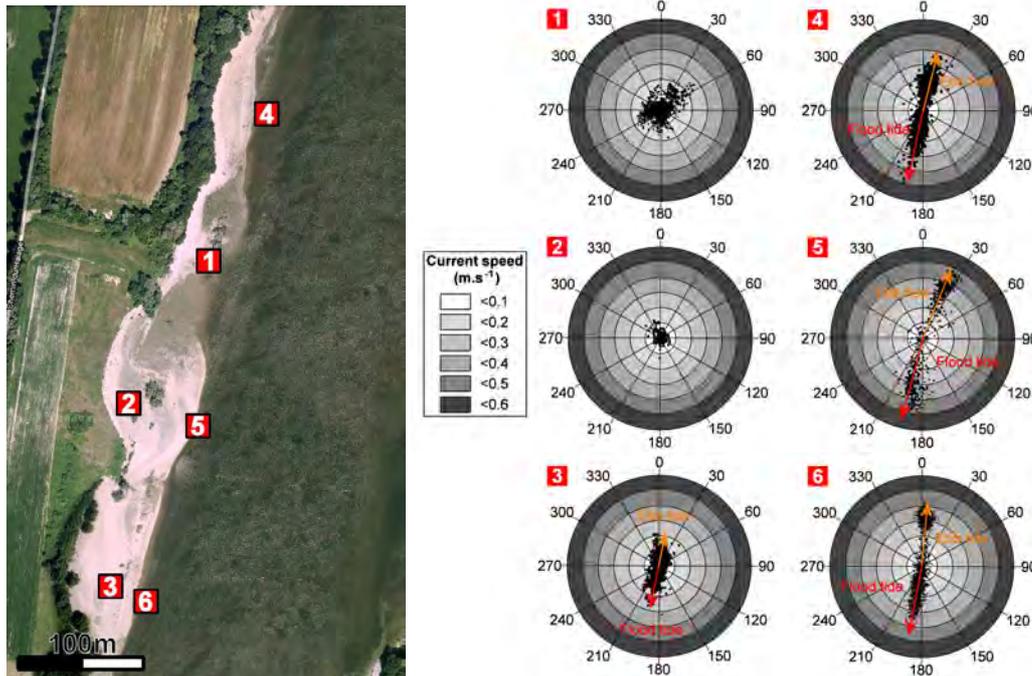


Figure 9 : Hodographes sur la zone de Bardouville (station 6=station de référence).

## 2.4. Evolution temporelle du site de Bardouville

Afin de mettre en évidence les variations rapides de topographie et de morphologique de la plage de Bardouville, un suivi sur 15 jours a été mis en place en période de fort coefficient de marée (du 02 au 18 Octobre 2010 ; coefficient de vive-eau maximum de 112). Au cours de cette campagne, une mission de terrain journalière a effectuée : pour chaque date, 6 mesures topographiques sur des stations piquets (Lesourd, 2000) et 6 prélèvements de sédiment de surface ont été effectués le long d'un transect cross-shore (cf. Fig. 4a).

Les données topographiques montrent que les sédiments de surface de cette zone de Bardouville sont extrêmement mobiles, les variations topographiques extrêmes sont comprises entre -5.5 et +7.5 cm (Fig. 10a). Sur cette période de morte-eau/vive-eau de forts coefficients, la partie haute de l'estran est la plus mobile avec des érosions et des sédimentations enregistrées sur ce site. Sur la partie médiane de l'estran, les variations topographiques correspondent également à des périodes d'érosion et de sédimentation, mais d'ampleurs plus limitées. Enfin la partie basse de l'estran, et notamment la station la plus proche du chenal montre un engraissement relativement limité (+3cm au maximum). Les variations de la granulométrie, au travers du grain moyen ( $D_{50}$ ) le long du transect cross-shore ont été représentées sur la figure 10b. L'écart type du grain moyen est compris entre 0.075 et 0.24mm. De manière globale, la granulométrie est plus fine ( $D_{50}$  plus faible) en partie basse de l'estran comparativement à la partie haute, bien que les variations temporelles soient fortement marquées (Fig. 10b). Ces évolutions granulométriques sont confirmées par les photos du site, notamment une diminution du  $D_{50}$  pour le 11<sup>ème</sup> jour, lié à un apport de sédiments vaseux dans la partie haute de l'estran (Fig. 10c). Ce plaquage vaseux a été entièrement remobilisé à partir du jour 15 (Fig. 10c).

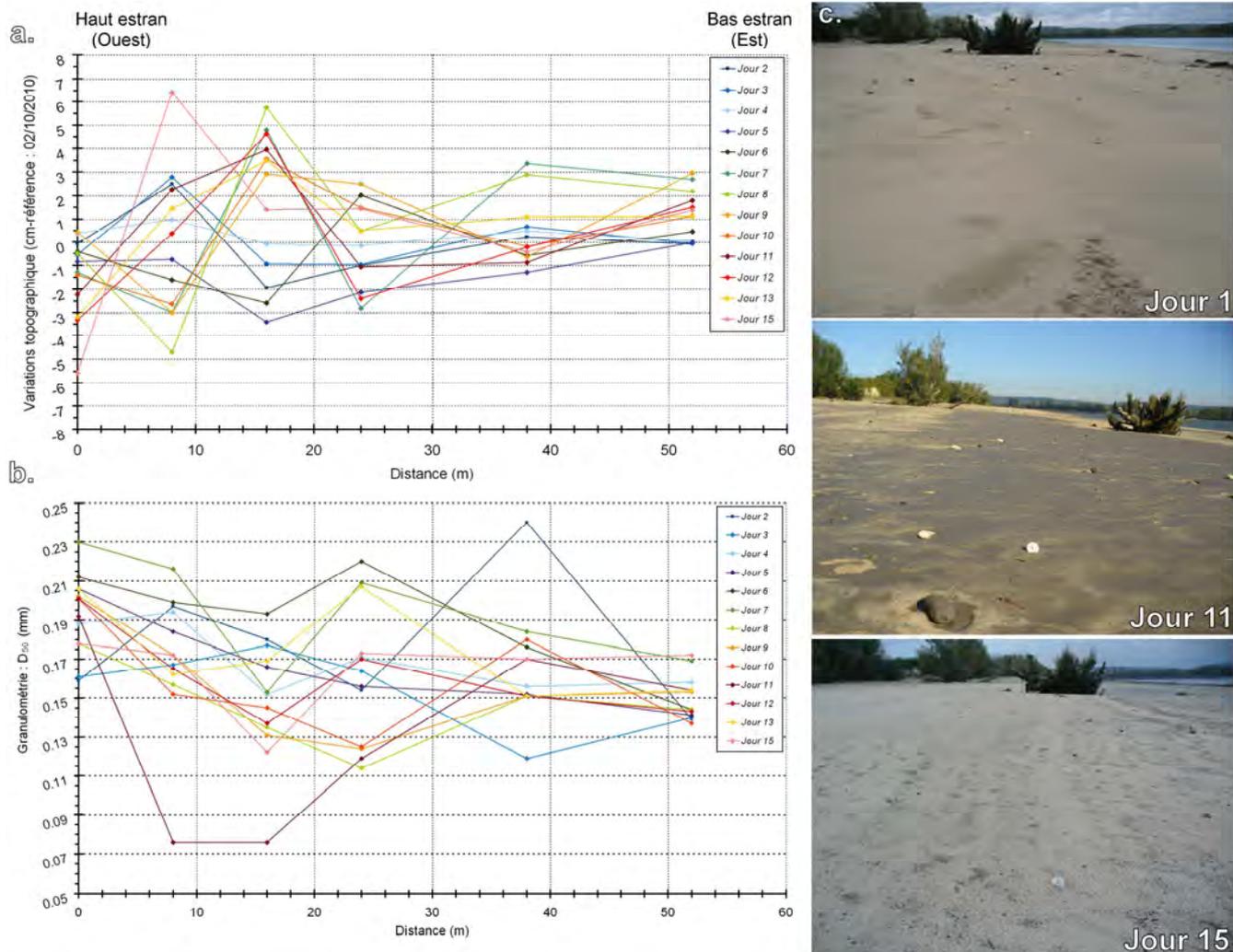


Figure 10 : Evolution temporelle le long d'un transect cross-shore de l'estran de Bardouville durant un cycle morte-eau/vive-eau (du 02 au 18/10/2010) : a. Evolution de la topographie, le premier jour de mesure comme référence ; b. évolution du D50 ; c. photographies d'une partie de l'estran (jour 1, jour 11 et jour 15, photos : O. Blanpain)

## 2.5. Le site de Petiville

En complément du site de référence de Bardouville, le site de Petiville a été instrumenté (Fig. 1). Le choix de ce site est porté par (i) la présence d'un sédiment de surface de type vase fluide dans la zone du bouchon vaseux (Fig. 11a), (ii) la présence de végétation et de chenaux transverses dans la partie haute de l'estran (Fig. 11a et 11b) et (iii) cette vasière est localisée dans une zone interne de méandre.



Figure 11 : Faciès sédimentaires de la zone intertidale de Bardouville (photos : O. Blanpain/M. Lemoine) : a. Photographie de la surface vaseuse de la vasière ; b. chenaux transverses et c. passage de bateau au niveau de la zone de Petiville.

La topographie de la zone de Petiville a été investiguée à l'aide des données LIDAR acquises à marée basse avec une définition de l'ordre de 3 points.m<sup>2</sup> (données GIP-SA ; 2010-2011). En complément les données de bathymétrie acquises par sondeur multifaisceaux (données GPMR) ont permis de s'intéresser à la zone subtidale dans cette zone de l'estuaire.

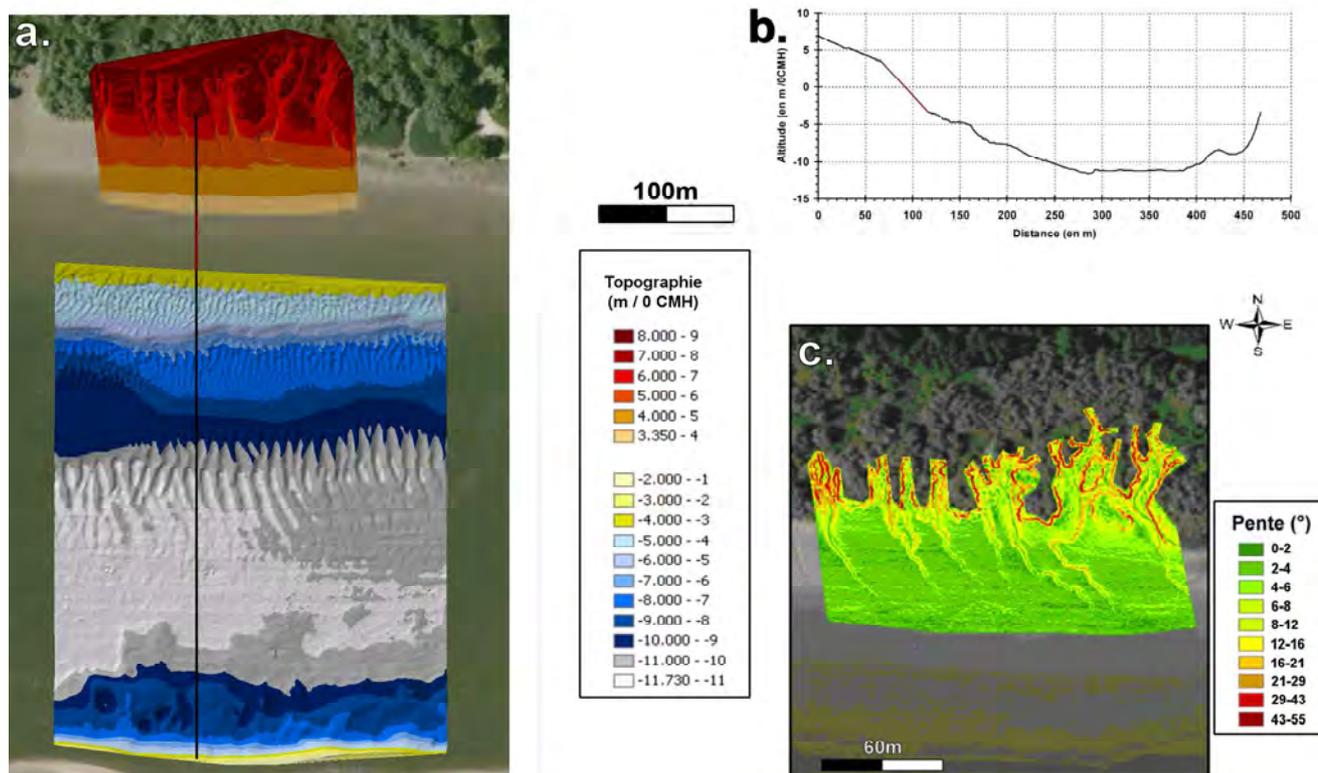


Figure 12 : Assemblage des données topographiques (GIP-SA) et bathymétriques (GPMR) de la zone de Petiville : a. carte topographique ; b. exemple de profil bathymétrique (localisation sur la fig. 4a) et c. carte des pentes sur la zone intertidale

La couverture sédimentaire des sédiments de surface (1<sup>er</sup> cm) a été obtenue à l'aide du prélèvement de 72 échantillons effectués en 2011 et répartis sur la zone d'étude, incluant des prélèvements dans les chenaux transverses. Ces échantillons ont été traités par microgranulométrie Laser. Les principaux modes enregistrés dans les sédiments de Petiville sont ceux retrouvés classiquement en Seine : 10, 45, 80 et 200µm. En moyenne,

les pourcentages d'argile, silts, et de sables des échantillons de surface sont respectivement de 5, 65 et 30%. La carte du grain moyen ( $D_{50}$ ) des échantillons de surface est reportée sur la figure 13.

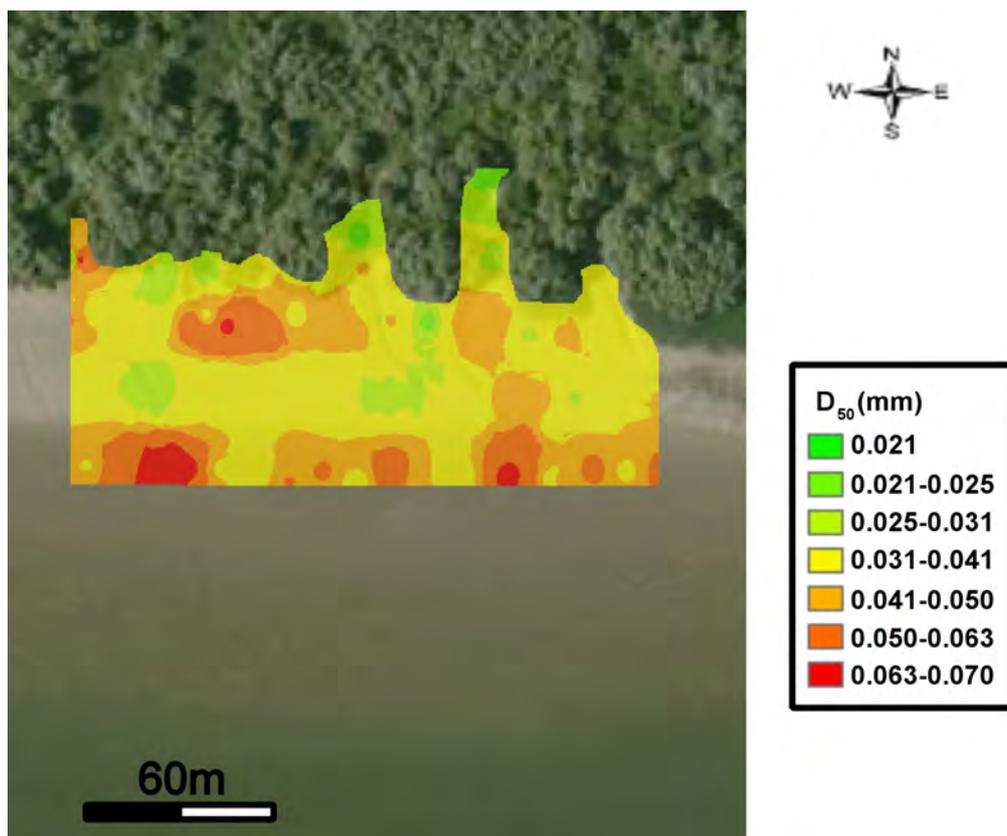


Figure 13 : Carte de la distribution de la granulométrie ( $D_{50}$ ) sur le site intertidal de Bardouville. Interpolation de type IDW avec 4 points et de puissance 2.

La distribution sédimentaire est relativement délicate à interpréter en raison de l'effet de point liée aux méthodes d'interpolation et à la faible discrimination des valeurs de  $D_{50}$ . Toutefois, on notera que le grain moyen est plus élevée à l'intérieur les filandres ( $D_{50}$  de 50 à 73 $\mu$ m) comparativement au reste de la surface de la vasière ( $D_{50} < 50\mu$ m). Cette tendance est certainement liée à un entraînement des particules les plus fines à l'intérieur des filandres.

Les données bimensuelles acquises le long d'un transect long shore (3 stations piquets, Fig. 12a) démontrent que les variations topographiques sont relativement importantes (entre +15 et -15cm, Fig. 14). De plus, le comportement sédimentaire entre la partie haute, moyenne et basse de l'estran n'est pas synchrone.

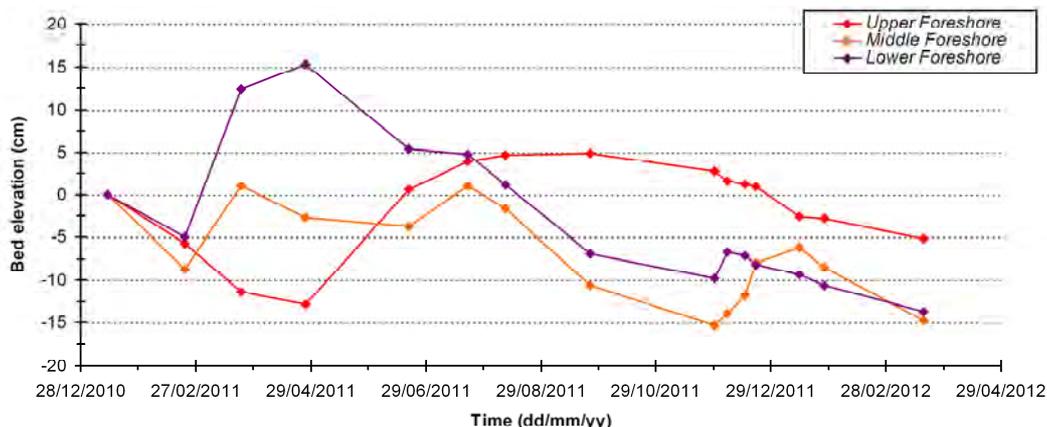
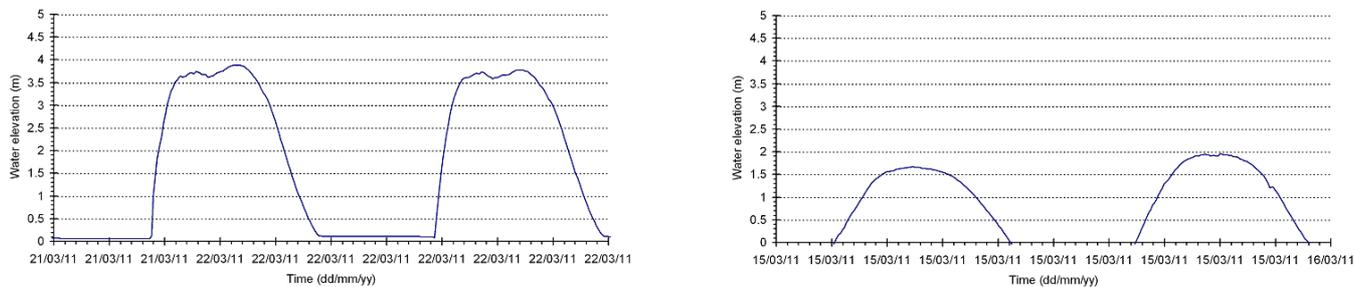


Figure 14 : Evolution temporelle de la topographie des 3 stations piquets de la vasière de Petiville le long d'un transect cross-shore.

En revanche, les prélèvements mensuels effectués sur le site de Petiville au niveau du transect cross-shore (Fig. 12a) montrent que les variations temporelles de la granulométrie sur la vasière de Petiville sont limitées.

Au niveau de la zone de référence, les hauteurs d'eau sont comprises entre 1.5m et 4.0m respectivement en période de morte eau et de vive eau (Fig. 15). Dans cette zone de l'estuaire, l'asymétrie de la marée est peu marquée, mais l'étale de pleine mer est marquée, notamment avec la tenue du double plein marqué en période de vive-eau.



**Figure 15 : Evolution de la hauteur d'eau sur le site de Petiville**

### III. Résultats scientifiques

#### 3.1. Méthodologie de la mesure de Terrain

Sur le site de Bardouville, la stratégie d'acquisition est la mesure à haute fréquence (4Hz) et en continu d'un courantomètre ADV SONTEK® Hydra-Ocean, d'un turbidimètre et d'un altimètre NKE® (1 mesure/minute). L'ensemble de ces instruments ont été positionnés en bas d'estran (station de référence, Fig. 9), afin d'obtenir une série de données significatives (acquisition si la hauteur d'eau >20cm) et dans la zone, qui statistiquement, la plus favorable à la remise en suspension par l'effet du batillage (Fig. 16).

L'ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) permet notamment de mesurer l'évolution de la surface libre à l'aide d'un capteur de pression de haute précision (précision de +/- 0.001%), les directions et les vitesses de courant (résolution de  $0.1\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  et précision de +/-1%). La fréquence d'acquisition a été fixée à 4Hz afin d'avoir un compromis entre une fréquence qui permet d'accéder à la turbulence, tout en permettant une autonomie mémoire suffisante car l'autonomie électrique est assurée durant 2 mois par un lot de 4 batteries rechargeables (Verney et al., 2007). L'instrument est positionné sur un bâti rigide en aluminium afin de limiter l'oscillation de l'ADV notamment au cours des périodes où les vitesses de courant sont maximum (Fig. 16). Les résultats montrent que les oscillations du bâti ne sont pas significatives sur l'enregistrement de l'ADV. Le positionnement de l'instrument sur le bâti permet une mesure à 5cm au dessus de la surface du sédiment, dans la zone de la couche limite. Les données de courants permettent notamment de calculer la turbulence. Les taux de cisaillement au fond ont été estimés par la méthode de covariance (Kim et al, 2000; Voulgaris et Meyers, 2004) en dehors des périodes de vagues. Au même instant, Z0 est calculé en se basant sur le profil de vitesse logarithmique (Soulsby et Humphrey, 1990). La contrainte de cisaillement liée aux vagues est calculée suivant Soulsby (1997) ; les vitesses des ondes orbitales et la période des vagues sont déduites à partir du spectre d'élévation de la surface libre (Wiberg et Sherwood, 2008). Les contraintes de cisaillement maximum vagues-courant ont été calculées avec le modèle d'interaction vague-courant décrit par Soulsby (1995).

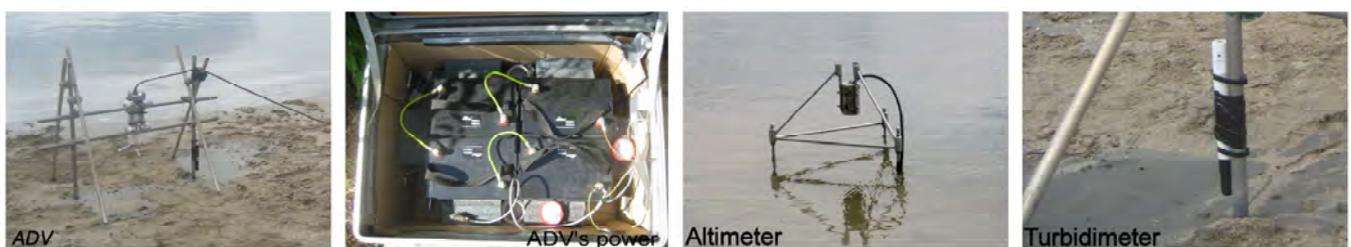
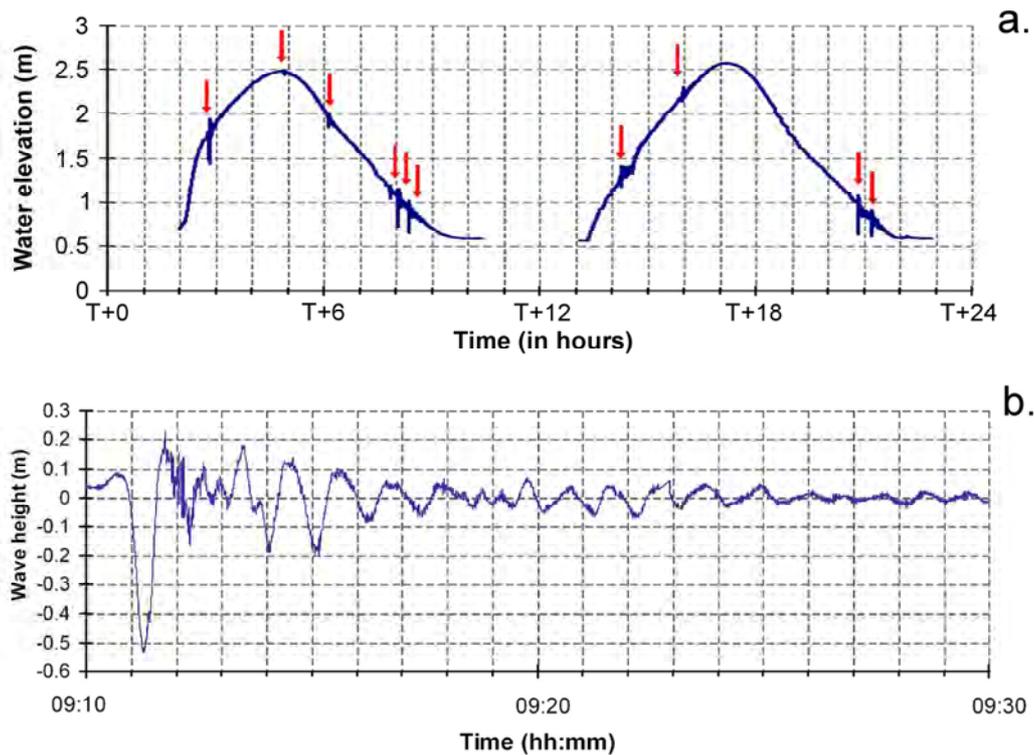


Figure 16 : Photographie de l'instrumentation implantée sur le site de Bardouville (photos : O. Blanpain).

Les mesures à une fréquence de 4Hz permettent de mettre en évidence le passage de bateaux notamment à l'aide du capteur de pression (Fig. 17). La figure 17a présente les variations de hauteur d'eau au cours de 2 marées semi diurnes. A cette échelle d'observation, les passages de bateaux sont facilement identifiables, en raison du train d'onde qui modifie la hauteur du plan d'eau. Au cours de ces deux cycles de marée, 10 passages de bateau ayant entraîné une modification du plan d'eau ont été enregistrés. La figure 17b montre un zoom sur l'un de ces passages de bateau, afin de faciliter la représentation, le signal de hauteur la hauteur des vagues a été filtrée de l'évolution de la hauteur d'eau liée à la marée (Fig. 17b). En première approche, on notera (i) la présence

d'une première vague d'amplitude importante (~60cm dans cet exemple) ; (ii) la durée de l'événement de l'ordre de la minute et (iii) la présence de deux fréquences qui se surimposent.



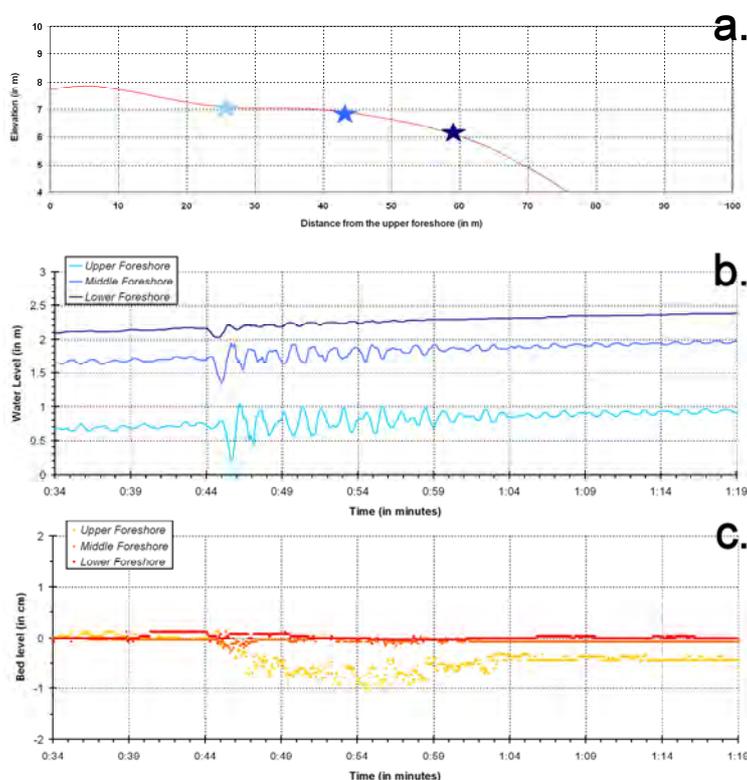
**Figure 17 : Evolution de la hauteur d'eau liée au batillage. a. Echelle de deux cycles de marée semi-diurne et b. Echelle d'un événement.**

Le turbidimètre NKE©-STBD mesure la turbidité en NTU (Nepheloid Turbidity Unit) acquit par lumière retrodiffusée, capteur *Seapoint STM*), la température et la hauteur d'eau à l'aide d'un capteur de pression. L'instrument est positionné sur le bûtit de l'ADV afin de mesurer à une distance de l'ordre de 5cm du fond (Fig. 16). L'altimètre NKE Altus permet de mesurer le temps de trajet entre un échosondeur et la surface du sédiment. Le temps de trajet de l'onde acoustique est transformé en distance par le traducteur. La position de l'échosondeur étant fixe sur le bûtit, les données de distance permettent de rendre compte de l'évolution temporelle de la surface de la zone d'estran (i.e. périodes d'érosion et de sédimentation) en un point. La résolution de l'échosondeur est de 0.6mm et sa précision est de +/- 2mm.

En complément et de manière ponctuelle, un granulomètre LISST 100X-C a été déployé sur le site de Bardouville afin de déterminer la granulométrie des particules en suspension, la gamme de cet appareillage étant de 2.5 à 500µm. Cet instrument n'a pas été déployé sur le site de Petiville, car la concentration en matières en suspension est trop élevée et ne permet pas l'acquisition de mesures fiables.

La variabilité spatiale de l'impact du batillage a été étudiée à l'aide de mesures effectuées régulièrement sur le long d'un transect long-shore du bas vers le haut de l'estran (Fig. 10). Afin de prendre en compte l'évolution de l'onde de batillage le long de ce profil, et notamment l'impact de la morphologie de l'estran (i.e. pente). Pour effectuer cette partie de l'étude 3 altimètres et 3 turbidimètres ont été installés le long du profil étudié : bas d'estran (référence), milieu de l'estran et en haut de l'estran au cours d'un cycle de ME/VE en période de forte vive-eau (Fig. 18a). Un exemple de passage d'un navire autour de l'étales de haute mer de vive eau est présenté, notamment les conséquences sur l'évolution de la hauteur d'eau (Fig. 18b) et sur le transport sédimentaire (Fig. 18c). Cet exemple montre la modification de l'onde de batillage au cours de son déplacement le long de la zone

intertidale, et plus particulièrement l'effet de la pente qui amplifie les vagues de batillage. D'un point de vue sédimentaire, la zone impactée est celle où la tranche d'eau est la plus faible (haut d'estran) avec une érosion maximale de 1cm, la zone de moyen et de bas d'estran ne semblent pas/peu affectés par le passage de ce navire, en raison de la tranche d'eau plus importante.



*Figure 18 : Variabilité spatiale du batillage sur la zone intertidale de Bardouville*

*a. Positionnement des instruments sur le profil ; b. Evolution de la surface sur les 3 zones de l'estran et c. variations topographiques sur les 3 zones de l'estran.*

### **3.2. Relation caractéristiques des navires et ondes mesurées sur la zone intertidale.**

L'objectif de cette partie de l'étude est de tenter de relier les caractéristiques des bateaux aux données de variations de hauteur d'eau et turbulence enregistrées sur la zone intertidale. Au total, plusieurs milliers de passages de bateaux et les vagues associées ont été enregistrés. Cette étude a permis d'obtenir un set de données significatif et unique à l'échelle internationale. En lien avec l'objectif présenté, les données présentées ci-dessous visent à extraire les tendances observées à partir (i) d'exemples représentatifs ou (ii) de données synthétiques.

Les caractéristiques des navires ont été obtenues par le biais des systèmes AIS (Automatic Identification System) équipant les navires maritimes. Ce système d'échanges automatisé de messages par radio VHF, permet de connaître en quasi « temps réel » (le taux de rafraîchissement de l'information est variable) l'identité, le statut, la position et la route des navires se situant dans la zone de navigation. Une convention d'usage des données a été établie entre le GPMR et le laboratoire M2C (avec clauses de confidentialité). Le GPMR a transmis sur différentes périodes de 3 mois, les données AIS au niveau de la zone de Bardouville élargies afin d'obtenir plusieurs transmission AIS par bateau. Ces données brutes sont composées de la date de l'enregistrement AIS, position X, Y

du navire, sa vitesse par rapport au fond, le cap du navire, sa longueur, sa largeur et son tirant d'eau. Ces données nécessitent de prendre en compte les points suivants : (i) les navires fluviaux ou de plaisance n'ont pas obligation de posséder un système AIS et (ii) une partie des données AIS ne sont pas exploitables (e.g. valeurs de tirant d'eau, de longueur ou de largeur à 0 ou données aberrantes) et (iii) les bateaux passant à basse mer lorsque la zone intertidale n'est pas immergée ne sont pas pris en compte. Cette partie des données a été éliminée au cours d'un premier traitement. Le croisement des données AIS et des données ADV permet de renseigner une matrice de données qui renseigne les caractéristiques des navires en fonction des données disponibles (Tableau B).

Date de l'enregistrement AIS
Position GPS
Cap
Vitesse par rapport au fond
Vitesse de surface
Largueur
Longueur
Type de bateau
Direction (navire montant ou descendant)
Tirant d'eau
Clair sous quille
Coefficient de blocage
Distance à l'ADV
Coefficient de marée
Débit

**Tableau B : Paramètres obtenus via le système AIS (données GPMMR, indiqué en noir) ou recalculé à partir des données ADV (en rouge).**

La vitesse de surface est déduite à partir de la vitesse par rapport au fond de l'AIS et de la vitesse des courants obtenus par l'ADV au moment du passage du bateau dans la zone de Bardouville. Pour le type de bateau soit le nom du bateau est disponible ou déduit des dimensions du bateau et du tirant d'eau, ce qui permet, dans la majorité des cas, de distinguer les navires fluviaux, fluvio-maritimes et maritimes. La direction du bateau est obtenue à l'aide de sa position GPS, du cap ou de la distance parcourue entre deux émissions du système AIS (si autres données non valides). Le clair sous quille est calculé à partir de du tirant d'eau du bateau, du profil bathymétrique du chenal relié à la position GPS du bateau et à la hauteur d'eau mesuré par l'ADV au moment de son passage sur la zone de Bardouville. Le coefficient de blocage (différent du coefficient de Bloc) a été défini par Schoellhamer (1996) puis Soomere (1997) et représente le ratio du produit entre la largeur du navire/tirant d'eau par le produit de la largeur/profondeur du chenal. Enfin, la distance à l'ADV est calculée à partir de la position GPS respective du bateau et de l'ADV.

A partir des données AIS, ADV, STBD et altimétriques, les paramètres sont calculés pour chaque passage de bateau (Tableau C).

Paramètre	Valeur Min	Valeur Max	Moyenne
Ditance navire-ADV (m)	49.70	223.00	134.53
Vitesse navire en surface (Nœuds)	2.12	8.04	5.58
Longueur Navire (m)	12.00	229.00	118.28
Largeur Navire (m)	6.00	90.00	18.40
Tirant d'eau (m)	0.80	11.30	5.83
Clair sous quille (m)	0.52	14.88	7.93
Débit ( $m^3.s^{-1}$ )	116.00	675.00	295.22
Coefficient de marée	35.00	116.00	73.44
Hauteur d'eau sur la zone intertidale (m)	0.59	3.48	1.62
Nombre de froude FR_H	0.19	0.77	0.48
Nombre de froude FR_L	0.08	0.52	0.18
Coefficient de Blocage	0.00	0.39	0.06
Vitesse du courant zone intertidale ( $m.s^{-1}$ )	-0.30	0.42	-0.01
Vitesse du courant chenal ( $m.s^{-1}$ )	-0.87	0.91	-0.03
Hauteur max. des vagues (m)	-0.01	0.34	0.08
Hauteur min. des vagues (m)	-0.68	0.01	-0.13
Vitesse max. des vagues ( $m.s^{-1}$ )	0.01	3.33	0.50
Vitesse min. des vagues ( $m.s^{-1}$ )	-3.46	-0.02	-0.46
Amplitude de la hauteur d'eau (m)	0.00	0.65	0.14
Frottement	0.04	3.21	0.60
Frottement_c	0.00	1.77	0.32
Amplitude des vagues	0.00	0.89	0.21
Frottement_w	0.01	2.93	0.38
Rapport sw/lw	0.10	4.00	0.71
Frottement_w(sw)	0.00	2.29	0.27
Frottement_w(lw)	0.00	0.91	0.14
Ub	0.01	0.19	0.06
Période_w	2.72	30.45	9.94
Période_w(sw)	2.11	5.99	3.48
Période_w(lw)	17.57	47.35	30.72
Tp_lw	1.02	73.14	57.49
Tp_sw	1.02	9.85	4.51
Longueur de rugosité Z0 (m)	0.00	0.00	0.00
Distance de déferlement (m)	11.22	75.00	36.26
Altus 30mins après passage navire (cm)	-5.47	6.95	-0.10
Altus 1jour après passage navire (cm)	-7.88	6.05	-0.18

**Tableau C : Paramètres calculés pour chaque passage de bateau, les valeurs minimales, maximales et moyennées prennent en compte le passage d'environ 1700 navires**

En première approximation, il existe une distinction entre les bateaux de type barge et les navires maritimes. La figure 18 montre deux exemples caractéristiques de la distinction entre l'onde générée par les barges (Fig. 18a) et celle générée par les navires maritimes (Fig. 18b). Dans les deux cas, on observe un train d'onde avec deux longueurs d'onde représentées : l'une de l'ordre de 5s et l'autre autour 60s. Dans les deux cas, la durée de l'événement est d'une dizaine de minutes. Dans le cas du navire maritime, on remarque la présence d'une première vague d'ordre de grande amplitude qui arrive sur la zone d'estran. Cette vague est interprétée comme étant la conséquence de la vague de squat (enfoncement dynamique du navire, marqué dans les chenaux), dans l'exemple présenté, cette première vague est de l'ordre de 60cm sur l'estran. Il semble que pour la barge, ce phénomène est beaucoup plus limité. La mesure des vitesses de courant montre que dans les deux cas, le maximum d'augmentation est lié à la première vague qui atteint l'estran. Cette augmentation s'exprime principalement en cross-shore l'augmentation des vitesses en long-shore sont plus limitées, et que l'augmentation des vitesses verticales est quasi-absente. En long shore, cette augmentation est de l'ordre de  $\pm 0.8m.s^{-1}$  pour le navire maritime et de  $\pm 0.2cm.s^{-1}$  pour la barge. Enfin, la figure 18 montre deux exemples des conséquences

sédimentaires du passage des navires sur la zone d'estran. Une augmentation de la turbidité est enregistrée en lien avec l'érosion du sédiment de surface, ces processus sédimentaires s'expriment essentiellement lors du début de l'événement. L'ordre de grandeur de l'érosion est respectivement de -1.7cm (Fig. 18a) et de -0.3cm (Fig. 18b), cette augmentation de la charge de matières en suspension est cohérente avec l'ampleur de l'érosion enregistrée.

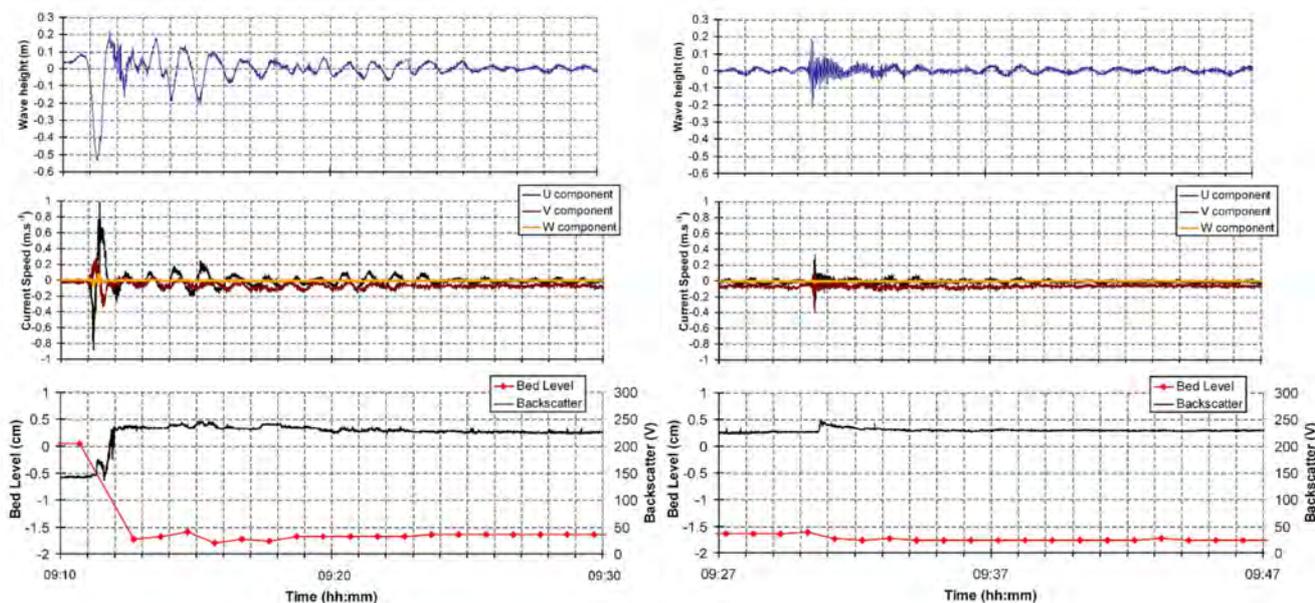


Figure 18 : Evolution du plan d'eau, des vitesses de courant et de la topographie pour a. un bateau maritime et b. un navire fluvial.

Les deux exemples d'enregistrement présentés dans la figure 18 peuvent être comparés aux études préalablement publiées (Figure 19).

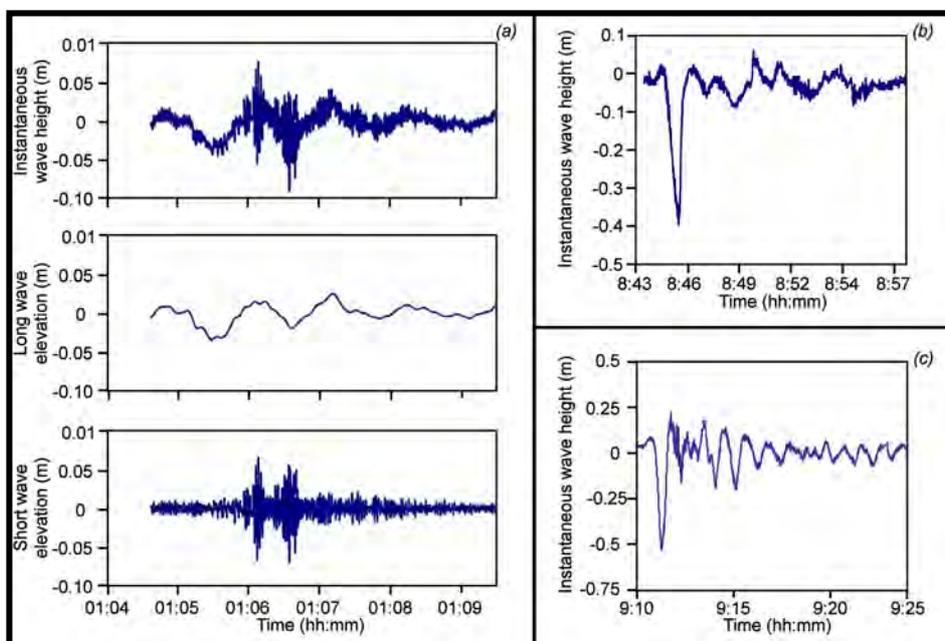
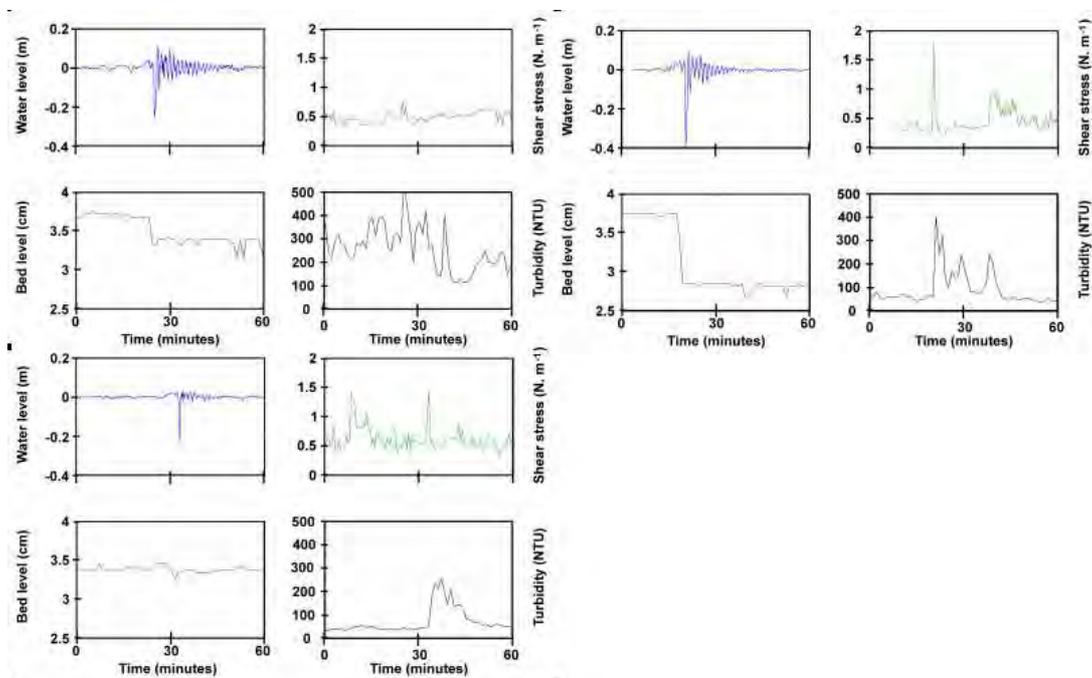


Figure 19 : Comparaison de l'évolution de la surface libre liée à un passage de bateau  
a. Verney et al., 2007 passage d'une barge ; b. Rapaglia et al., 2011 « événement de grande magnitude » et  
c. cette étude, bateau maritime.

La comparaison des données montre que les fréquences enregistrées au cours d'un passage de navire montrent souvent la présence de deux longueurs d'onde de l'ordre de quelques secondes et une seconde de l'ordre de la minute. La figure 19a montre les résultats acquis dans la partie amont de l'estuaire de la Seine (passage d'une barge), ces résultats sont similaires à ceux obtenus sur la figure 18a. L'enregistrement de l'onde d'un passage d'un « événement de grande magnitude » dans le lagon de Venise (Fig. 19b) est très proche de l'enregistrement que nous avons obtenu pour le passage d'un navire maritime en estuaire de la Seine (Fig. 19c), notamment avec l'enregistrement de la première vague de grande amplitude liée à l'effet du squat.

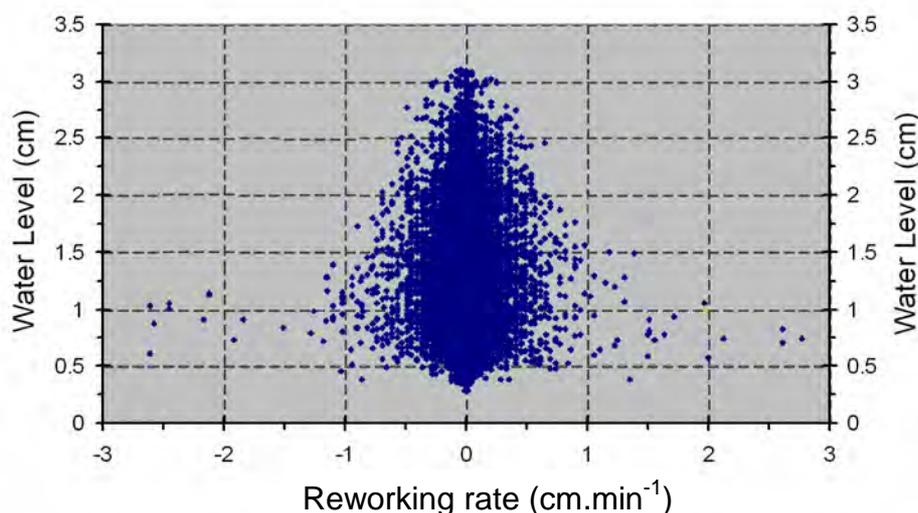
Toutefois, la mise en relation entre les caractéristiques des navires et les ondes générées (et leur impact sédimentaires) ne peut pas être exprimée de manière aussi réductrice. Ainsi, le passage d'un même bateau peut générer des ondes et un impact sédimentaire différent en fonction des paramètres du navire (tonnage, vitesse, tirant d'eau, direction...) et les paramètres environnementaux (hauteur d'eau sur le site, granulométrie des sédiments de surface, moment de la marée...). La figure 20 présente les variations de hauteur d'eau (filtrés de la marée), la contrainte de cisaillement au fond, l'évolution sédimentaire et la turbidité pour le passage d'un même navire maritime au niveau du site de Bardouville (GPMR, *Comm pers*). Cette figure démontre que pour un même bateau, les ondes générées peuvent être d'amplitude et de durée variables, ce qui génère une contrainte de cisaillement, une remise en suspension et une érosion variable en fonction des paramètres du bateau, mais essentiellement dans cet exemple en fonction des contraintes environnementales. Ainsi, la corrélation entre les caractéristiques des navires/environnementales et le train d'onde enregistré au niveau de la zone intertidale est complexe. De même, les tentatives de mettre en relation les paramètres calculés (Tableau C) ne sont pas satisfaisantes et ne permettent pas de mettre en relation deux paramètres (e.g. amplitude de la première vague et clair sous quille). De même l'utilisation de relations proposées dans la littérature (Schollhamer, 1996 ; Rapaglia et al., 2011) se sont révélées infructueuses pour l'estuaire de la Seine. Cette constatation est certainement liée à la pluralité des navires qui naviguent en estuaire de Seine et de la multiplicité des conditions en estuaire de la Seine.



**Figure 20 : Comparaison de l'évolution de la surface libre, de la contrainte de cisaillement, de la topographie et de la turbidité liée au passage d'un même bateau à 3 périodes distinctes.**

Parmi les paramètres environnementaux, la hauteur d'eau est un paramètre essentiel. Il est à noter que le passage d'un bateau peut générer un train d'onde d'amplitude importante, mais peu impacter le site de mesure : si

la tranche d'eau est importante en partie basse de l'estran, la contrainte de cisaillement, la remise en suspension et l'érosion générée sera limitée au regard des variations de la surface libre. L'impact du batillage sera alors plus significatif dans la partie de haute de l'estran, zone où la tranche d'eau est faible. La figure 21 représente le taux de remaniement (érosion ou sédimentation déduits de l'altimètre) au niveau de la zone basse de l'estran en fonction de la hauteur d'eau. Cette figure démontre que l'effet du batillage est limitée ( $\pm 1 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  par passage de bateau) lorsque la hauteur d'eau est inférieure à 1.5m sur la partie basse de l'estran. Le remaniement le plus important a lieu lorsque la hauteur d'eau est faible ( $\pm 3 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ).

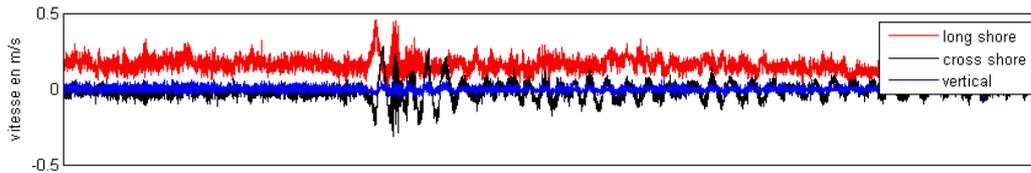


*Figure 21 : Evolution du taux de remaniement en fonction de la hauteur d'eau*

La figure 21 représente un taux de remaniement, et non un taux d'érosion et de sédimentation, car il peut s'agir d'une modification de la morphologie de la surface (e.g. formation de rides) sans déplacement significatif du matériel. En conséquence, en fonction du moment de la marée, la zone maximale impactée par le batillage varie (cf. Fig. 5). A titre d'exemple, le passage d'un bateau à haute mer au cours d'une marée de vive-eau (hauteur d'eau en bas d'estran de 3m) sera enregistrée par le capteur de pression, mais n'impactera pas de manière significative la partie basse de l'estran, mais engendrera une modification sédimentaire et/ou morphologique dans la partie haute de l'estran, zone où la tranche d'eau est faible. Toutefois, statistiquement, la partie haute de l'estran est relativement peu touchée par le batillage car cela nécessite la conjonction d'une hauteur d'eau significative et du passage d'un bateau au moment de l'étale de haute mer (Fig. 21).

Un autre paramètre « environnemental » à prendre en compte est la direction du courant de marée au regard de la direction de navigation du navire. La figure 21a montre un exemple d'un bateau qui navigue contre le courant alors que la figure 21b montre l'exemple d'un navire qui navigue avec le courant. La présentation de ces exemples montre l'inversion du sens de la vitesse long-shore lors de la dépression initiale. Cela implique un transport résiduel vers le haut de l'estran ou vers le chenal au cours de la 1<sup>ère</sup> vague d'amplitude et d'énergie plus importante.

a.



b.

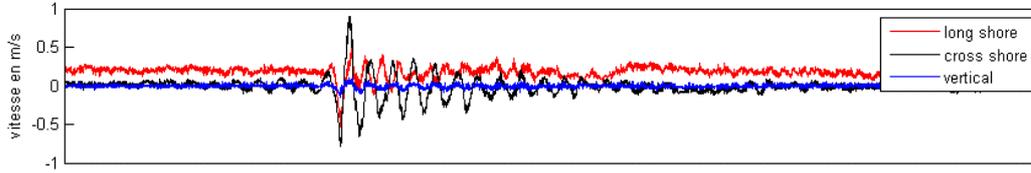


Figure 21 : Comparaison des vitesses de courant au cours du batillage en fonction de la direction des courants de marée a. bateau remontant le courant, b. bateau dans le même sens que le courant.

Différents auteurs ont proposés des relations permettant de relier les propriétés des navires et les caractéristiques des vagues de batillage (Schoellhamer, 1996 ; Rapaglia et al., 2011). Ces relations se basent sur l'utilisation sur l'enregistrement de 10 à 50 bateaux. L'utilisation de ces relations en estuaire de la Seine (basé sur 1700 passages de bateaux), ne se montre pas satisfaisante.

Il nous a semblé nécessaire de mettre en place une approche statistique afin de déterminer les relations entre les propriétés des navires et les caractéristiques des vagues de batillage enregistrées sur l'estran. Afin de relier les trains d'onde aux types de bateau, une analyse statistique de type ACP (analyse en composante principale) a été utilisée à partir des paramètres du tableau B. Cette analyse ACP ne s'est pas montrée satisfaisante car il existe un mélange de trop de variables qui n'ont pas les mêmes structures de variation, cela a pour conséquence l'absence de variance dominante. Une CAH (Classification Ascendante Hiérarchique, analyse de type « cluster ») a alors été mise en oeuvre. D'une part, cette analyse a été menée sur les types de bateau : 1717 passages de bateaux ont été pris en compte. Les 3 paramètres retenus pour la CAH sont : la vitesse de surface, la longueur du bateau et le coefficient de bloc. Le choix de ces paramètres sont déduits de l'ACP, car ils représentent les paramètres les plus structurants. Le dendrogramme de dissimilarité permet de distinguer statistiquement 3 types de navires sur le dendrogramme de la CAH (Fig. 22):

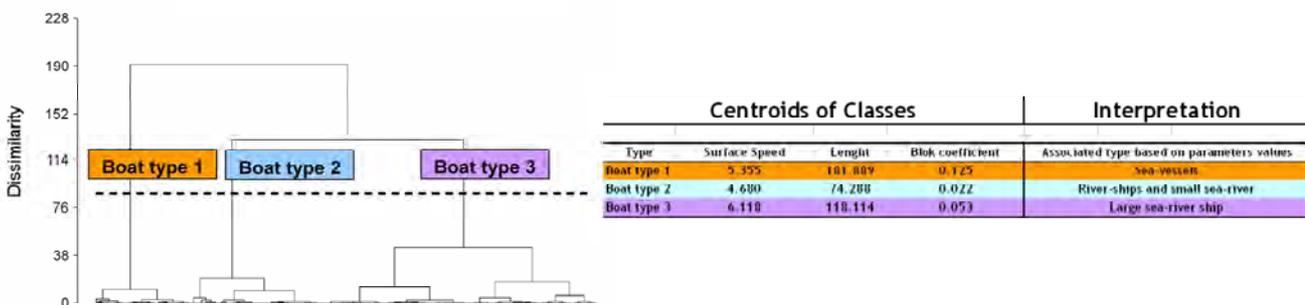


Figure 22 : CAH effectuée sur les paramètres des navires, le barycentre des classes est indiquée dans le tableau.

Les bateaux de type 1 et ceux du type 2 et 3 sont principalement différenciés en fonction du coefficient de blocage (proxy de l'enfoncement dynamique, cf. Fig. 16) et la séparation entre les types 2 et 3 se fait principalement sur la vitesse de surface et la taille.

Pour chaque passage de bateau (dans chaque type de bateau déterminé précédemment, Fig. 22), il est possible de déterminer la contrainte abordée par le biais du frottement. Ce frottement est alors comparé à la valeur critique du frottement proposée par Shields (1936) suivant un  $D_{50}$  de  $333\mu\text{m}$  (sable moyen, site de Bardouville) et de  $50\mu\text{m}$  (sédiment cohésif, site de Petiville).

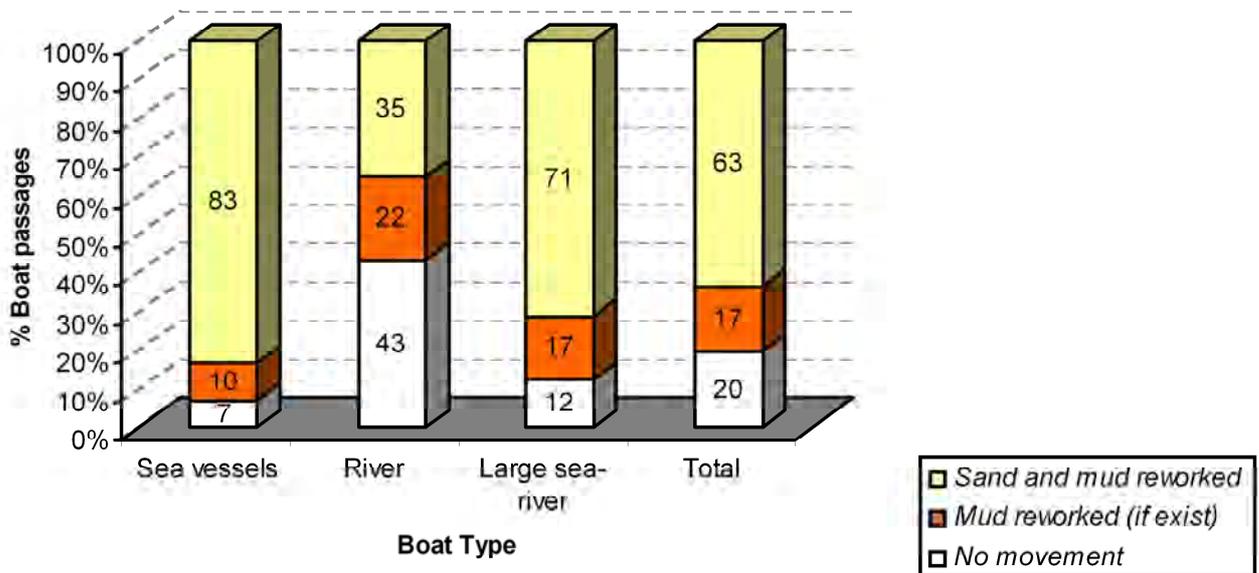
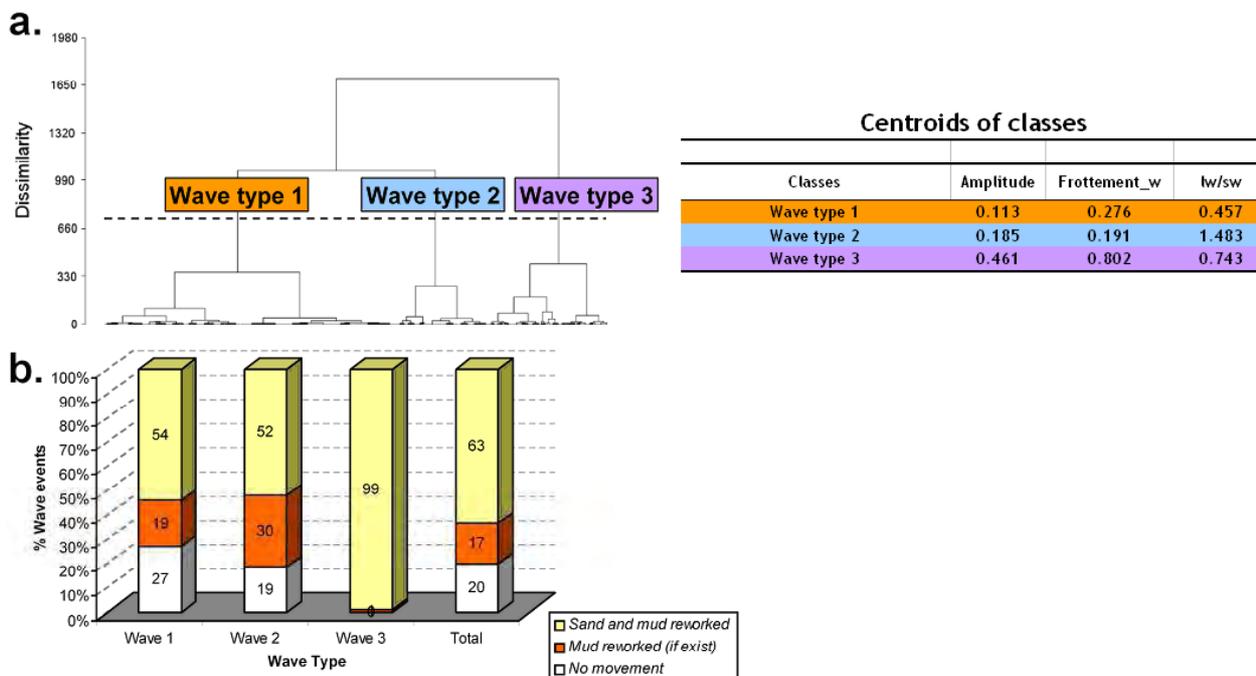


Figure 23 : Proportions de remise en mouvement potentielle des sédiments pour les caractéristiques des navires déduits de la CAH.

Cet exercice permet de montrer qu'environ 63% des bateaux sont susceptibles de générer une mise en mouvement des sédiments (sable et vase), 17% des passages de bateau vont induire uniquement un mouvement de la vase et 20% ne vont pas induire de mouvement. Il est à noter que cette approche doit prendre en compte les points suivants :

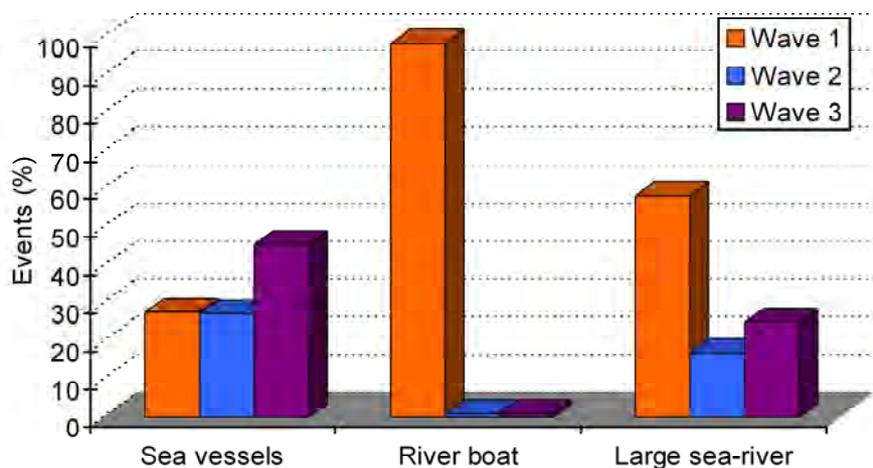
- (i) Les bateaux considérés sont ceux qui naviguent lorsque la zone intertidale de Bardouville est en eau.
- (ii) Ces données sont extrapolées de l'AIS, certains bateaux n'ayant pas obligation de posséder l'AIS en sont donc exclus.
- (iii) Cette analyse considère l'ensemble de la zone intertidale (et non uniquement au point de mesure), la zone impactée est celle où la hauteur d'eau est faible (cf. Fig. 19).

Des analyses similaires ont été effectuées sur les 1717 vagues associées aux navires (Fig. 24). Les 3 paramètres pris en compte sont : l'amplitude maximum du train d'onde, le coefficient de frottement et le ratio entre le frottement lié aux vague de courte période (5s) et celle de période plus longue (1min). Dans ce ces, 3 types de train d'onde sont distinguées (Fig. 24).



**Figure 24 :** a. CAH effectuée sur les paramètres des vagues, le barycentre des classes est indiquée dans le tableau et b. Proportions de remise en mouvement potentielle des sédiments pour les caractéristiques des vagues déduits de la CAH.

En revenant aux données de base, il est alors possible de relier les données « type de vague » versus « type de bateaux » (Fig. 25). Le croisement de ces données démontre qu'il est complexe d'associer un type de vague avec un type de bateau, à l'exception des bateaux fluviaux qui génèrent des vagues de type 1 (prédominance des vagues courtes à avec faible frottement et faible amplitude). Pour les bateaux maritimes, ils sont susceptibles de générer les 3 types de trains d'onde (respectivement 27.5 ; 25.2 et 45.3%), mais préférentiellement des vagues de type 3 (vagues courtes et longues, frottement et amplitude forts). De même les navires fluvio-maritimes génèrent tous les types de vagues avec préférentiellement des vagues de type 1 (respectivement 58.1, 16.9 et 25%). Ceci est cohérent avec les observations proposées sur la figure 18

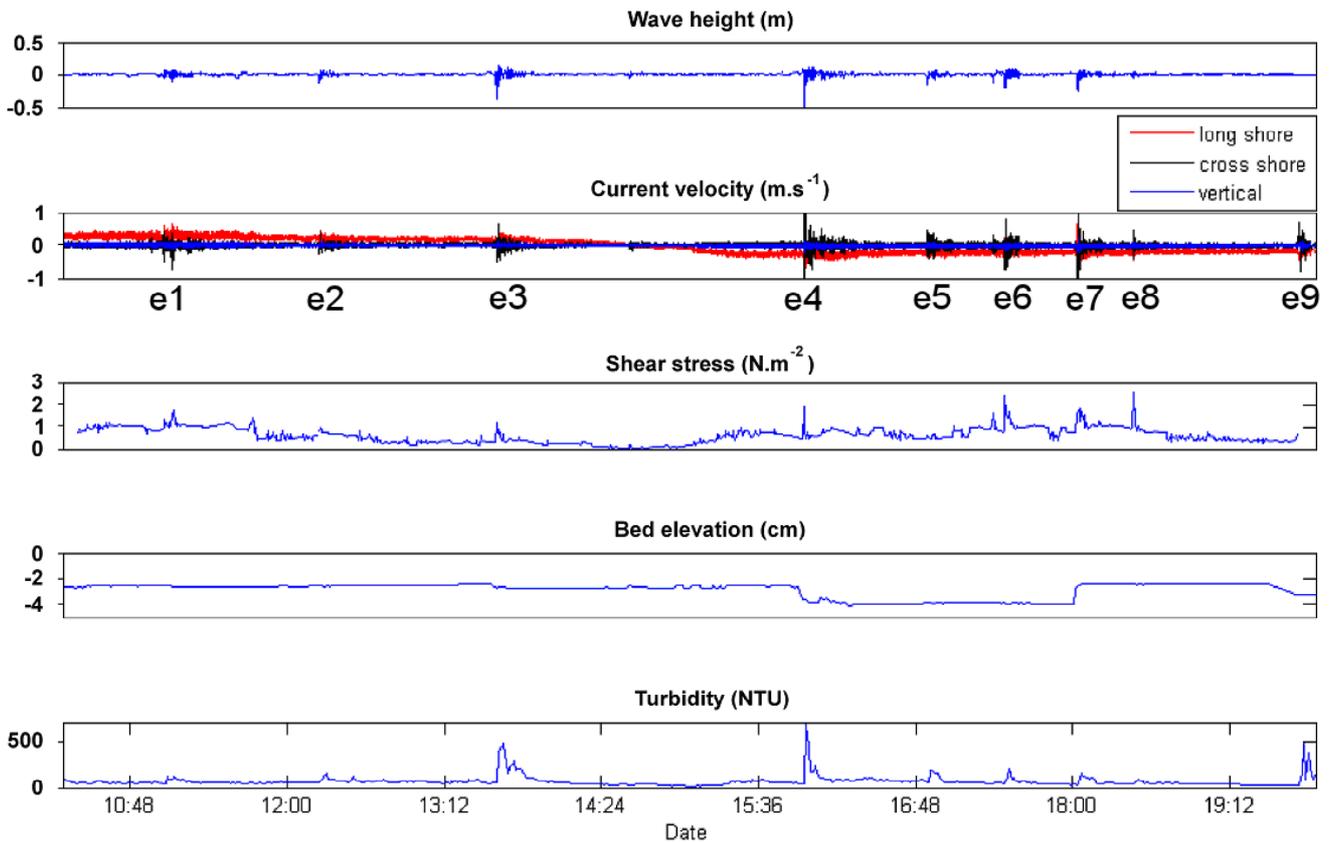


**Figure 25 :** Relation entre les types de vagues et les types de navires déduits des CAHs

### **3.3. Quantification l'impact des vagues de batillage sur le transport sédimentaire en zone intertidale**

Afin de déterminer l'impact du batillage sur le transport sédimentaire un altimètre et un turbidimètre ont été positionnés sur le site de référence de Bardouville dans la partie basse de l'estran. L'impact du batillage sur cette zone d'étude est une combinaison complexe entre le train d'onde généré, le moment de la marée et le type de sédiment de surface. A titre d'exemple, la figure 26 montre l'évolution de la hauteur d'eau en période de morte-eau (filtrée de la marée), des vitesses de courant, de la contrainte de cisaillement, de l'altimétrie et de la turbidité au cours d'un cycle de marée. Neuf passages de bateaux ont été enregistrés au cours de cette période, le dernier événement (e9) en fin de jusant ne sera pas discuté car le capteur de pression de l'ADV était hors d'eau.

Au cours de cette période, les courants de marée génèrent une contrainte de cisaillement au moment du maximum de courant (début de flot et renverse, de l'ordre de  $0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Les courants sont principalement orientés en long-shore, à cette période on observe une augmentation de la turbidité de l'ordre de 50NTU, alors qu'en période d'étales de haute mer, la turbidité est la plus faible, moment où les contraintes de cisaillement sont nulles. Toutefois, les données altimétriques ne semblent pas indiquer une érosion significative du sédiment (quelques millimètres) : le matériel en suspension dans la masse d'eau provient, au moins en partie, du chenal. Chaque passage de navire engendre une modification de la surface libre associée à une augmentation des vitesses de courant (cross-shore principalement) et de la contrainte de cisaillement comprise entre  $0.5$  et  $1.8\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ . L'augmentation de la turbidité est variable en fonction de l'événement, cette augmentation est comprise entre 20NTU (e1, Fig. 26) et 450NTU (e4, Fig. 26). De même, la réponse du sédiment est variable en fonction de l'événement, ainsi, on observe une réponse quasi-nulle (variation de quelques millimètres) pour les événements e1, e2, e5, e6 et e8 ; une érosion modérée (e3), une érosion forte (e4 et e9) ou une sédimentation (e7). Deux hypothèses peuvent être proposées pour expliquer ce mécanisme. (i) La zone de mesure se situe en partie basse de l'estran or la zone de l'estran où la tranche d'eau est la plus faible est la zone la plus impactée en terme d'érosion (Fig. 26). Ce matériel peut être, en fonction des courants de marée transporté vers la partie basse de l'estran. Le fait que la valeur de turbidité n'augmente pas pour l'événement e7 peut être lié à un charriage du matériel sableux sur le fond. (ii) Les processus e4 et e7 peuvent être liés à la formation de rides qui au niveau de la zone de l'altimètre peuvent être sur la crête ou le creux de la ride, donc uniquement un remaniement du matériel sans un transport significatif du matériel : cette modification de la morphologie est un impact du batillage (Fig. 6).



*Figure 26 : Evolution de la hauteur d'eau, des vitesses de courant, de la contrainte de cisaillement, de la topographie et de la turbidité au cours d'un cycle semi-diurne.*

Un autre exemple à l'échelle d'un cycle lunaire est présenté sur la figure 27. Cet exemple confirme que les courants de marée sont principalement long-shore et induisent des contraintes de cisaillement comprises entre 0.5 et 1  $N \cdot m^{-2}$ . Parallèlement, le batillage induit une augmentation des courant cross-shore, avec des événements extrêmes pouvant induire une augmentation des contraintes de cisaillement de l'ordre de  $7N \cdot m^{-2}$ . Cette augmentation des contraintes de cisaillement va induire une remobilisation de la partie basse de l'estran soit sous forme d'érosion ou sous forme de sédimentation, en fonction de la zone impactée par le batillage au moment du passage du navire. Ainsi, la topographie de la partie basse de l'estran est fortement contrôlée par ces événements, on retrouve de manière quasi-systématique une tendance de plus basse fréquence liée à la marée.

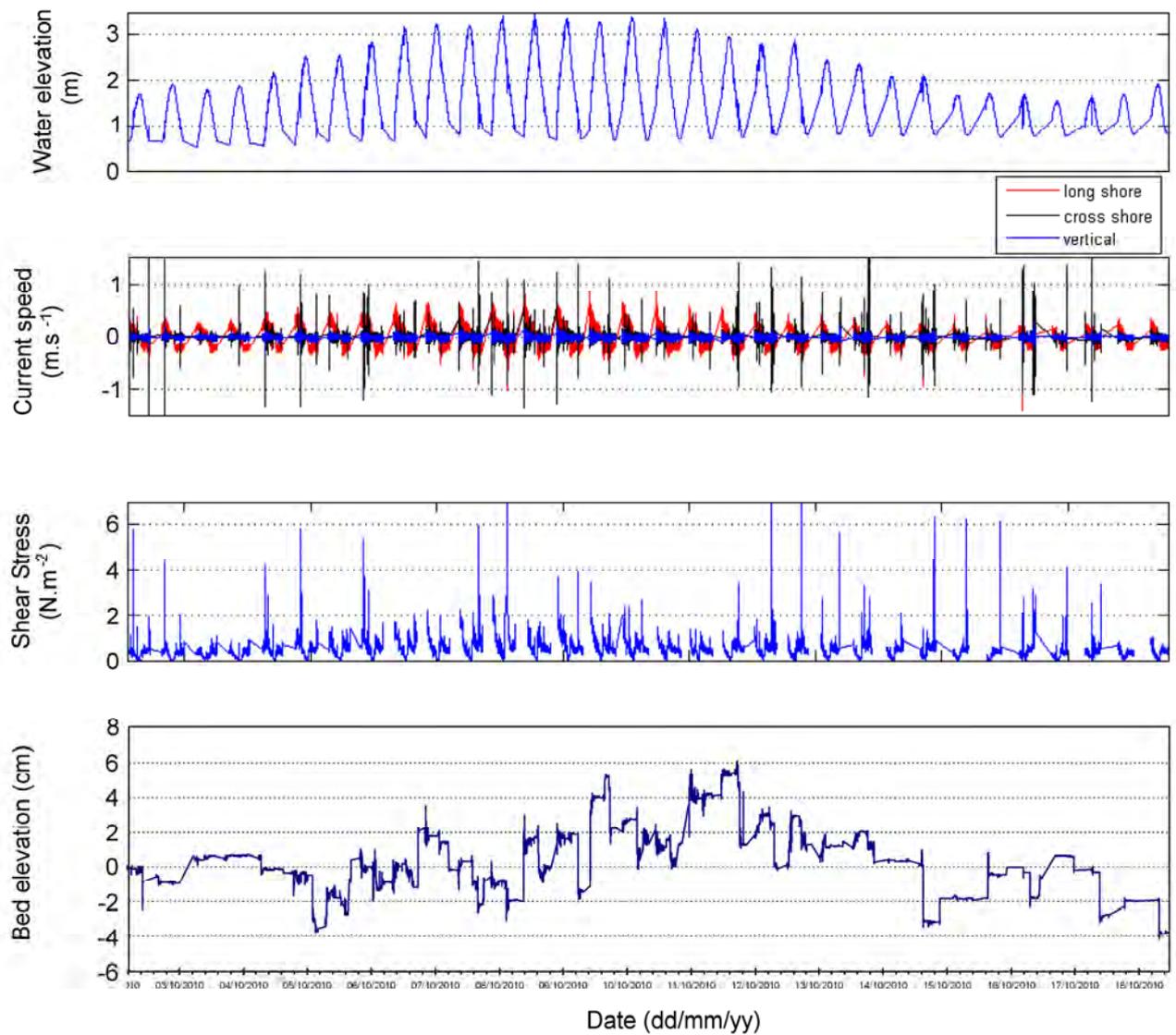


Figure 26 : Evolution de la hauteur d'eau, des vitesses de courant, de la contrainte de cisaillement, de la topographie et de la turbidité au cours d'un cycle semi-lunaire.

Afin de mettre en évidence l'impact de la marée sur le transport sédimentaire, le taux de remobilisation calculé à partir des données altimétriques et les données de turbidité sont présentés sur la figure 27.

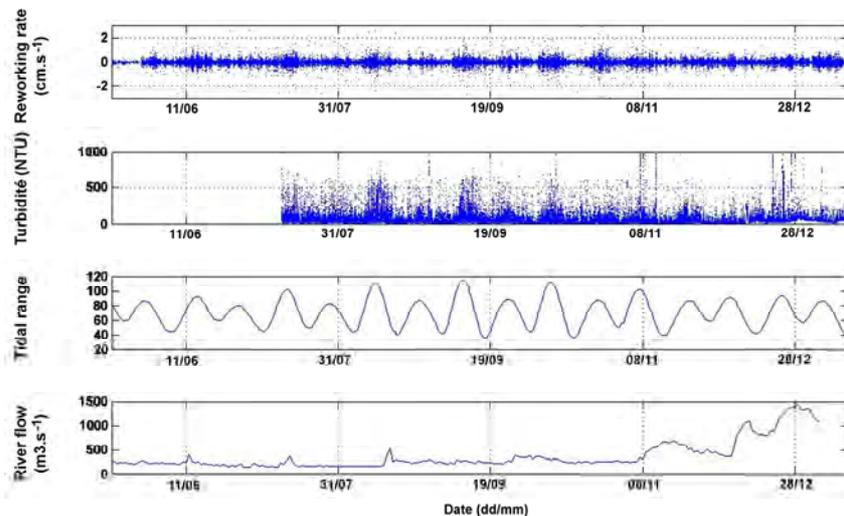


Figure 27 : Taux de remaniement, turbidité, coefficient de marée et débit sur une période de 6 mois.

Cette représentation permet de mettre en évidence les évènements de batillage et la remise en suspension associée, le rôle de la marée est également visible. En période de vive-eau, la zone de Bardouville est soumise à des variations topographiques et des concentration en MES plus importantes comparativement aux périodes de mortes-eaux.

La représentation des variations topographique à l'échelle annuelle montre que les variations à haute fréquence sont plus importantes en période d'étiage qu'en période de crue. En période de crue, la zone basse de l'estran est quasiment subtidale, la hauteur d'eau est donc statistiquement plus importante sur cette zone de l'estran. Pour cette raison, l'impact des ondes de batillage sont plus faibles sur cette partie de l'estran, mais sont certainement plus significatives sur les parties moyennes et hautes de l'estran. D'autre part, en début de crue, on remarque une érosion intense (15cm) et rapide (quelques jours), à l'inverse, une sédimentation (10cm environ) est enregistrée sur la partie basse de l'estran en fin de crue (Fig. 28).

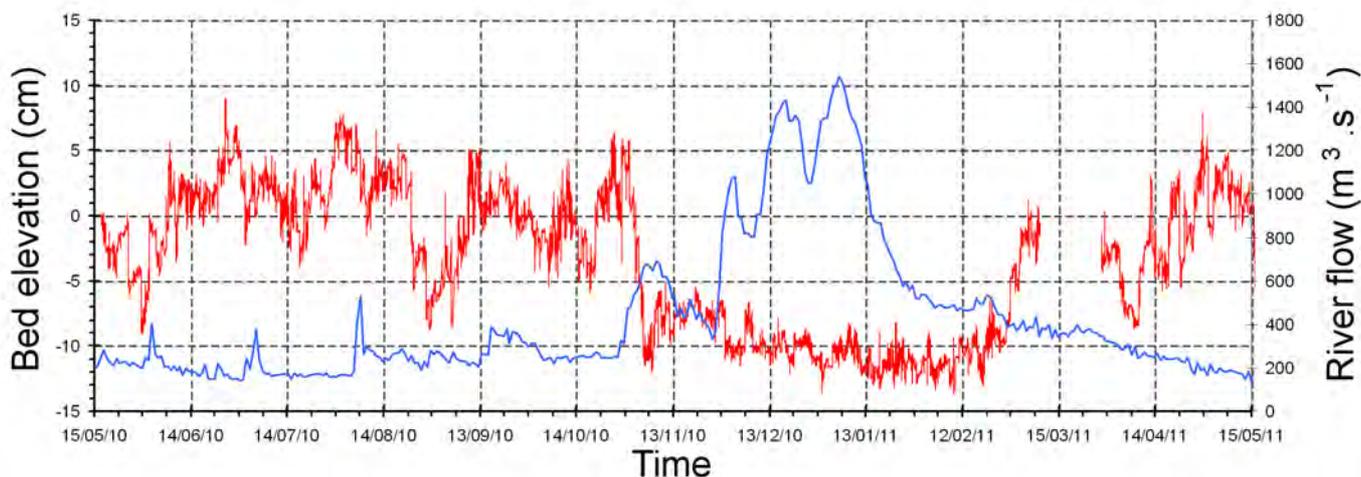


Figure 28 : Evolution annuelle de la topographie de la partie basse de l'estran de Bardouville

Au final, les vagues de batillage contrôlent l'évolution événementielle de la zone de Bardouville à l'échelle court-terme (minutes), l'évolution à moyen terme est contrôlée par les cycles de marée (jours) et l'évolution long-terme semble contrôlée par le cycle hydrologique. Au final, l'évolution de cette zone est une combinaison complexe de ces mécanismes

Toutefois, l'évolution topographique de la partie basse de l'estran, bien qu'elle soit extrêmement dynamique, est nulle. Le niveau revient à l'état de départ au bout d'une année. Une comparaison de la topographie de la vasière le long du profil entre 2009 et 2010 montre la même tendance (Fig. 29). A l'exception du pied de la zone, pas de transfert sédimentaire significatif sur le site, uniquement du recyclage du matériel présent sur le site.

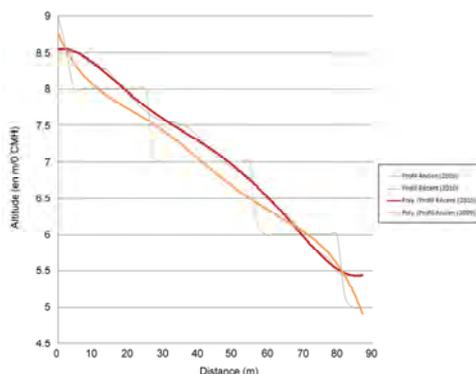


Figure 29 : Comparatif de l'évolution temporelle (2009-2010) de la topographie le long du transect de l'estran de Bardouville.

Afin de relier les types d'ondes générées par les vagues et la remise en suspension des sédiments sur la zone intertidale sableuse une analyse statistique des données a été effectuée. Dans un premier temps, la figure 30 montre que 63% des 1700 passages de navire enregistrés est susceptible de générer une modification de la surface sédimentaire. Nous avons sélectionné les 63% des navires (soit environ 1081 individus) susceptibles de générer une érosion afin de les soumettre à des analyses statistiques similaires à celles présentées précédemment. De même que pour les analyses précédentes, les ACP ne permettent pas de mettre en évidence de variance dominante, toutefois la structuration est principalement centrée sur 3 paramètres (identiques à ceux identifiés précédemment : Amplitude, frottement lié aux vagues et rapport vagues courtes/vagues longues. Le dendrogramme permet de distinguer deux familles de vagues qui génèrent un remaniement du sédiment (Tableau D).

## Centroids of classes

Class	Amplitude	Waves Friction	lw/sw
Wave type A	0.457	0.671	1.059
Wave type B	0.196	0.478	0.504

Tableau D : Barycentres des classes pour les vagues qui remettent en suspension le matériel.

La classe A des vagues est représenté par une amplitude importante, un frottement lié aux vagues important et un rapport lw/sw élevé, à l'inverse du type B. Une analyse sur les 1081 navires qui composent la cohorte a été effectuée. Les résultats sont similaires à ceux présentés sur la figure 30 avec 3 types de bateaux : les navires maritimes, les navires fluviaux et les petit gabarits de type fluvio-maritimes et les grands gabarits de type fluvio-maritimes. Dans un second temps, nous avons croisé les analyses es vagues (type A et B) et les types de navires. Les résultats montrent que les bateaux de type fluvial ne génèrent que des vagues de type B, les bateaux maritimes génèrent préférentiellement des vagues de type A (60.4%) et les navires fluvio-maritimes génèrent préférentiellement des vagues de type B (71.2%).

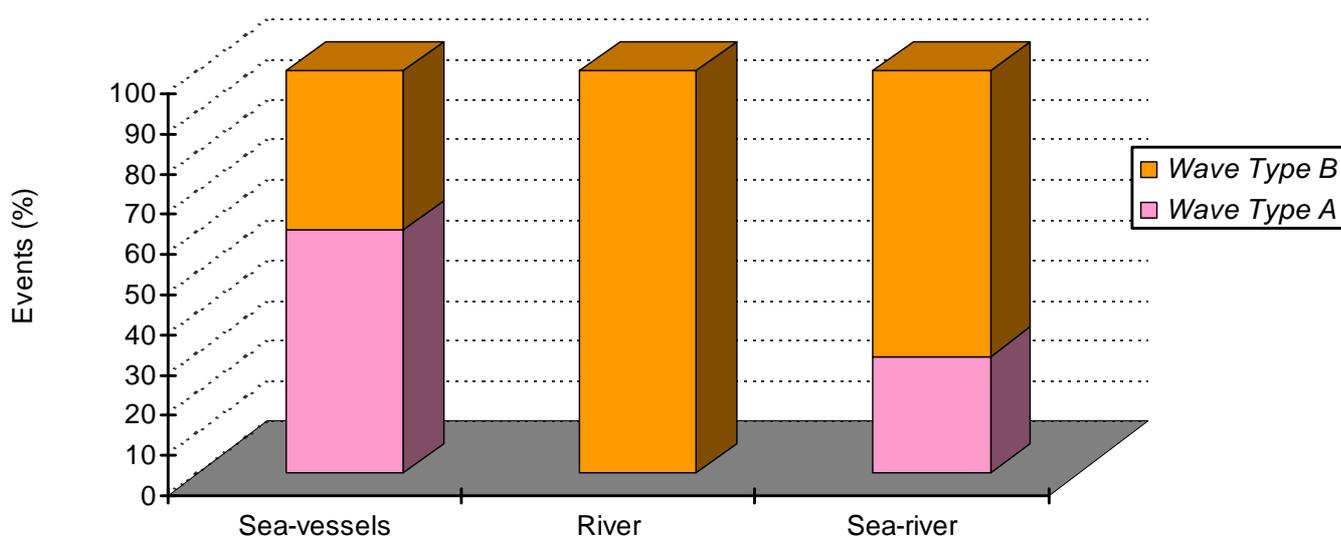


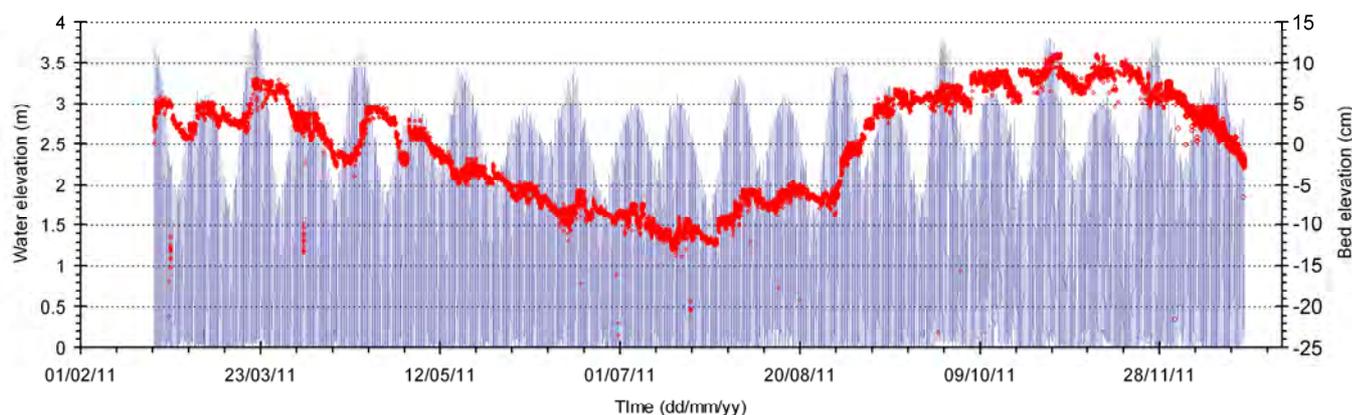
Figure 30 : Comparaison des types de navires (cf. Fig. 22) et les vagues qui remobilisent le sédiment sableux

Afin de déterminer les conditions suivant lesquelles, les bateaux de type maritimes et fluvo-maritimes génèrent des vagues de type A ou B, une analyse statistique non paramétrique de Kruskal-Wallis a été entreprise. Les résultats montrent que les bateaux maritimes génèrent des vagues de type B lorsque les bateaux sont descendants avec un courant relativement fort à marée basse (faible clair sous quille associé à un coefficient de bloc important) et à faible vitesse. Ils génèrent alors des vagues de faible amplitude et un frottement lié aux vagues marqués par les ondes courtes. A l'inverse, dans toutes les autres conditions, les bateaux maritimes génèrent des vagues de type A. Pour les bateaux fluvo-maritimes, la distinction entre le type de vagues générées est principalement lié aux dimensions des bateaux : les bateaux les moins longs/larges et ayant un tirant d'eau plus faible vont générer des vagues de type B. A l'inverse les bateaux fluvo-maritimes les plus imposants vont générer des vagues de type A. Il semble donc que pour ce type de bateaux, les conditions environnementales ne soient pas un paramètre discriminant.

Au final, les analyses statistiques permettent de mettre en évidence que la remobilisation de la zone intertidale de Bardouville est effectuée suivant deux types de vague. Pour les bateaux fluviaux et fluvo-maritime, le type de vague est fortement lié aux dimensions des bateaux, et peu liée aux conditions environnementales. En revanche, pour les bateaux maritimes, la création de vagues de type A ou B est dépendantes des caractéristiques des bateaux et des conditions environnementales. Les vagues les moins remobilisatrice sur la zone intertidale nécessitent : des bateaux descendants autour de la marée basse et à faible vitesse.

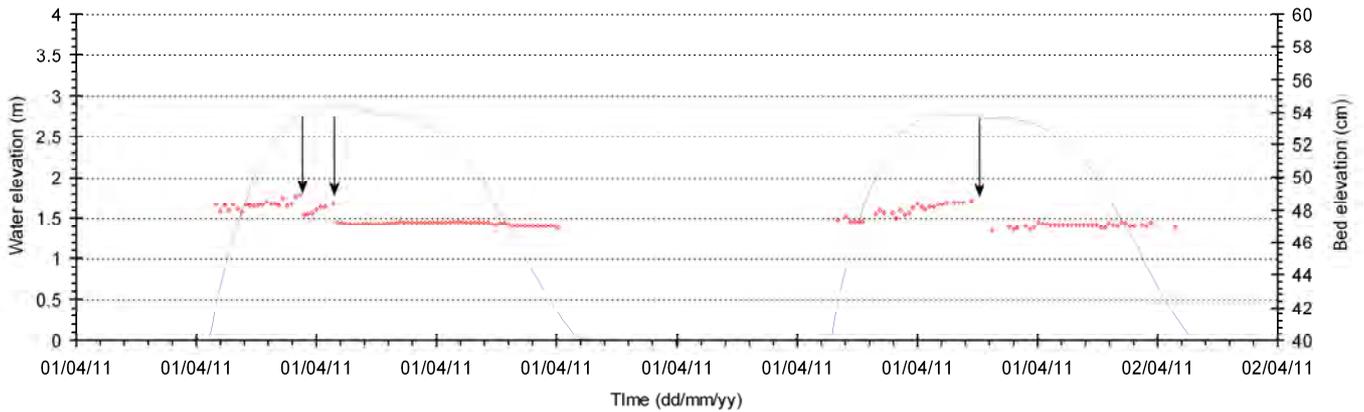
### **3.4. Comparaison : rôle du batillage sur la vasière de Petiville**

Les variations topographiques à l'échelle annuelle sur la vasière de Petiville sont présentées sur la figure 30. Cette figure montre que contrairement à la zone de Bardouville, les variations topographiques sont principalement contrôlées par la marée auquel se surimpose une cyclicité annuelle marquée : érosion en période estivale et sédimentation en période hivernale. Au final, les vagues de batillage semblent peu contribuer au transport de matériel sur le site de Petiville.



**Figure 31 : Evolution annuelle de la topographie sur le site de Petiville**

Toutefois, on enregistre de manière journalière des événements de batillage sur le site de Petiville, mais dont l'amplitude est relativement limitée (quelques millimètres à 2cm, fig. 32).



**Figure 32 : variation topographique sur la vasière de Petiville à l'échelle semi-diurne.**

L'une des causes probable de cet impact relatif du batillage sur la zone de Petiville est liée au fait que les navires passent préférentiellement au moment de la basse mer (lorsque la vasière est émergée) ou autour de la pleine-mer (Fig. 32). Ce phénomène couplé à la configuration du site : largeur du chenal plus important que sur Bardouville, zone interne de méandre, topographie de la zone et profondeur du chenal limitent les effets sédimentaires du batillage sur ce site.

### **3.5. Outils expérimentaux**

L'étude du batillage en laboratoire nécessite l'utilisation de techniques de mesures adaptées dans le but de caractériser l'écoulement. L'étude bibliographique a introduit le fait que les caractéristiques des vagues générées par les bateaux dépendaient d'un grand nombre de facteurs. Les paramètres étudiés lors de ce travail et leurs valeurs doivent être déterminées en prenant en compte les moyens expérimentaux disponibles et les données de terrain, ceci dans le but d'être représentatif de l'écoulement réel. La bibliographie a également permis d'introduire des méthodes de mesures des différentes grandeurs liées à l'écoulement. Ainsi les hauteurs de vagues sont mesurées à l'aide de sondes résistives et l'acquisition des vitesses est effectuée par PIV stéréoscopique. Dans cette partie, les outils expérimentaux sont présentés. Tout d'abord, le bassin, le bateau ainsi que le repère d'analyse des données et le choix des paramètres sont exposés. Dans un deuxième temps, le dispositif expérimental et les méthodes d'analyse correspondant aux mesures de hauteurs de vagues sont décrits. La technique de PIV stéréoscopique utilisée pour les acquisitions de vitesse dans l'écoulement est ensuite introduit.

#### **3.5.1 Le bassin des carènes**

Les essais expérimentaux sur maquettes ont été réalisés dans le bassin des carènes de l'institut Pprime (Fig. 33). La longueur du bassin est de 20,45 mètres pour une largeur de 1,49 mètres et pour une hauteur maximale de 1,2 mètres. Des hublots sont disposés sur chaque côté et sur le fond du bassin permettant ainsi l'utilisation de moyens optiques pour réaliser des mesures. Pour tracter le bateau, le bassin est équipé d'un chariot mobile. Ce chariot est piloté par ordinateur et accepte une gamme de vitesses comprises entre 0,2 m/s et 2,5 m/s.

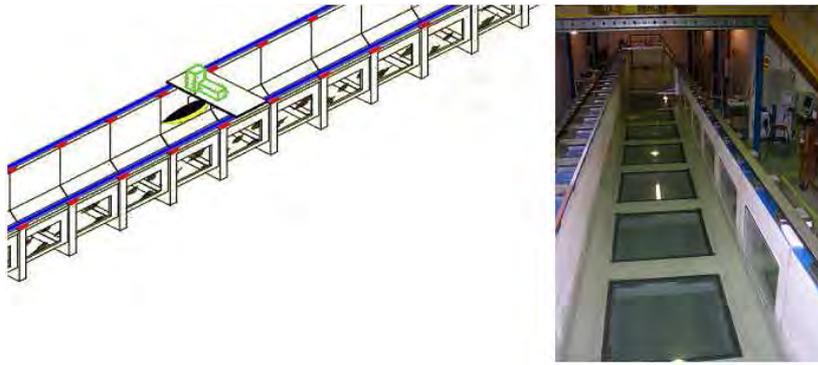


Figure 33 : Bassin des carènes

### 3.5.2 Le bateau

La maquette de bateau utilisée est de type « série 60  $C_b=0,8$  » (0a). Ce modèle est re-présentatif des navires de marchandises. Sa longueur est de 123 centimètres pour une largeur de 18 centimètres. Pour différents tirants d'eau, le volume d'eau déplacé a été déterminé (0). On observe que la courbe admet une rupture de pente pour un tirant d'eau d'environ 9,3 centimètres. Une fois cet enfoncement dépassé, la géométrie du bateau reste quasi constante, ce qui explique la diminution de pente.

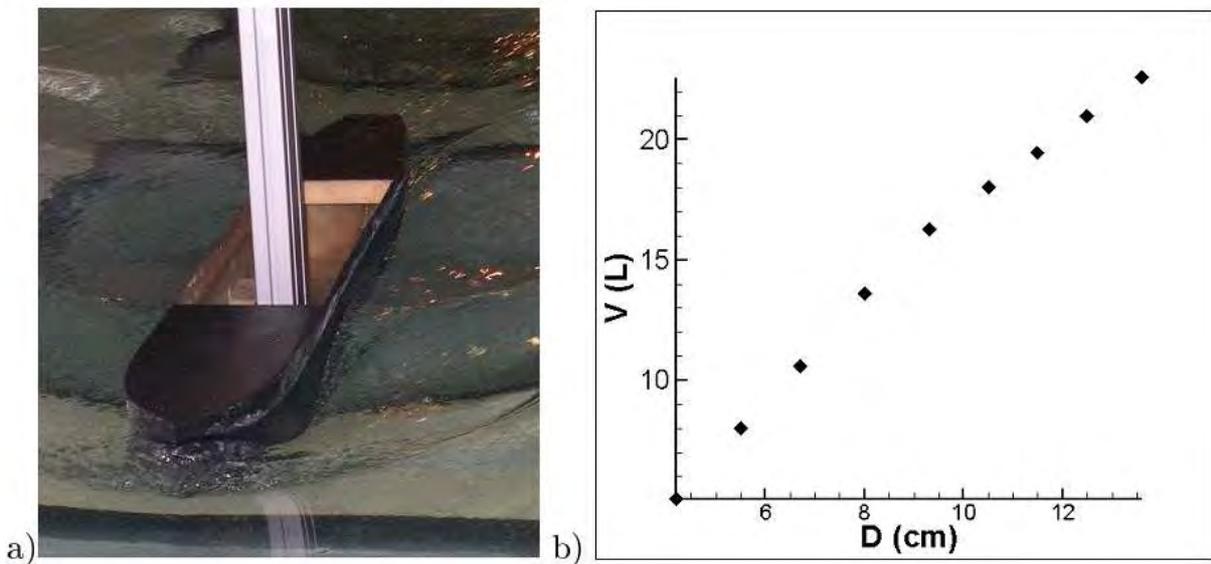


Figure 34 : Bateau « Série 60  $C_b=0,8$  » : a) photo du bateau ; b) Volume d'eau déplacé (V) en fonction du tirant d'eau (D)

Pour représenter les résultats obtenus, nous nous plaçons dans un repère orthonormé lié au bateau (Fig. 35). L'axe x est choisi parallèle à la direction d'avancée du navire et pointé vers l'arrière de celui-ci. L'axe y se rapporte à la direction horizontale et perpendiculaire à l'avancée du bateau. Enfin, z est l'axe vertical, pointant vers le haut. Le centre du repère de coordonnées (0,0,0) correspond au centre du bateau en x et y et à la position de la surface libre au repos en z.

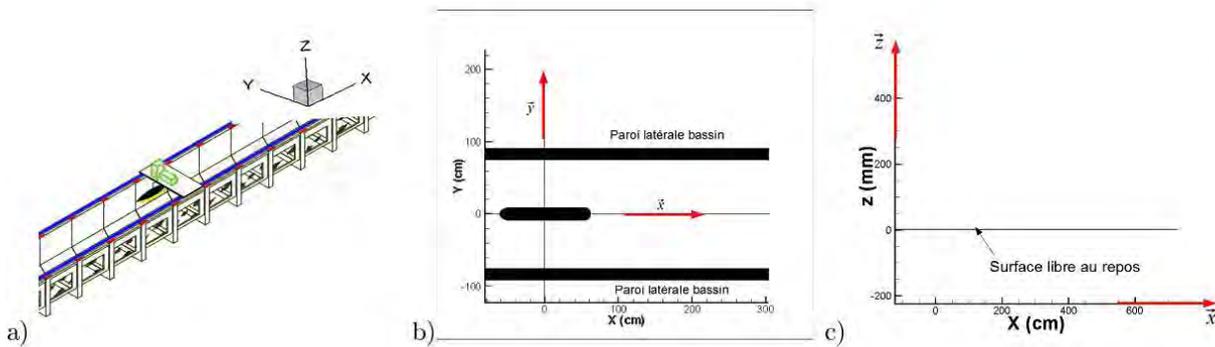


Figure 35 : Illustration du repère utilisé : a) Plan XY b) Plan XZ

### 3.5.1.1 Choix des paramètres

Lors des essais, nous avons choisi d'étudier l'influence de deux paramètres qui sont la vitesse du navire et le tirant d'eau. Les valeurs de ces deux paramètres ont été déterminées en s'appuyant sur des données de terrain, issue du port autonome de Rouen. Afin de passer des données de terrain aux valeurs utilisées en laboratoire, il est nécessaire d'utiliser des relations de changement d'échelles. Pour les écoulements à surface libre, on applique généralement une similitude de Froude qui exprime le rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur avec :

$$Fr = U_b / \sqrt{gL}$$

où  $U_b$  est une vitesse caractéristique de l'écoulement,  $L$  une longueur caractéristique de l'écoulement et  $g$  la constante gravitationnelle.

Pour les études de résistance à l'avancement des bateaux, ce nombre est défini communément par rapport à la longueur du navire. En ce qui concerne l'étude des ondes de batillage, on utilise habituellement un nombre de Froude calculé sur la profondeur.

La similitude de Reynolds qui exprime le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité n'est pas prise en compte. En effet, en posant un nombre de Reynolds tel que :

$$Re = U_b \cdot L / \nu$$

où  $L$  est la longueur de bateau et  $\nu$  la viscosité cinématique du fluide, il faudrait respecter à la fois l'égalité entre les nombres de Reynolds et de Froude.

On obtiendrait alors pour une viscosité constante :

$$L_M / L_R = \sqrt{(h_R / h_M)}$$

où l'indice M indique le modèle et R la réalité.

Dans notre cas, le rapport des longueurs est d'environ 1/100. Un rapport sur les hauteurs entre modèle et réalité de 10 devrait donc être respecté, ce qui n'est évidemment pas réalisable. La similitude est donc uniquement basée sur le nombre de Froude pour déterminer les vitesses étudiées. Les nombres de Froude rencontrés sur la Seine sont calculés à partir de données fournies par le Port Autonome de Rouen. Ces données se composent des caractéristiques des navires (longueur, largeur, tirant d'eau..) et de leurs vitesses. De plus, des données de terrain issues du site de Bardouville (en aval de Rouen) nous donnent la morphologie du fleuve dans cette zone. La profondeur  $y$  varie entre 11,7 mètres et 13,4 mètres pour des vitesses de navires d'environ 4,3 m/s. Cela correspond à un nombre de Froude proche de 0,4.

Pour les essais en laboratoire, la profondeur d'eau est la même pour tous les cas et égale à 45 centimètres. Cette profondeur a été déterminée pour avoir une zone de 10 centimètres d'eau au niveau des hublots et ainsi permettre des mesures optiques. Pour rester proche du nombre de Froude rencontré sur le terrain, le paramètre à fixer est donc la vitesse du bateau. Au cours de l'étude, 5 vitesses correspondant à une gamme de nombres de

Froude compris entre 0,23 et 0,48 ont été étudiées. Pour le tirant d'eau, nous avons étudié trois cas différents, une valeur correspondante à des navires à vide (6,5 cm), et deux autres, relatives à des navires chargés (9,3 et 10,7 cm). Pour chaque tirant d'eau, le volume d'eau déplacé a été évalué. Les différents cas de mesures réalisées sont listés sur la 0.

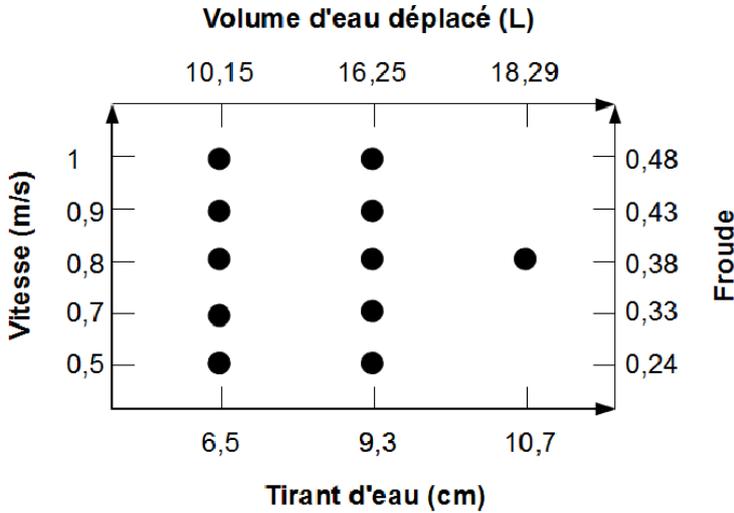


Figure 36 : Récapitulatif des cas étudiés en fonction de la vitesse du navire(ou du Froude) et du tirant d'eau (ou du volume d'eau déplacé)

### 3.5.1.2 Mesure de hauteur de vague

Dans le but de mesurer les hauteurs de vagues autour de la maquette, nous utilisons un dispositif de sondes résistives de la société HR Wallingford (Fig. 37). Ces sondes sont composées de deux tiges métalliques isolées l'une de l'autre, auxquelles est appliqué un courant électrique. Le courant circulant entre les deux tiges est proportionnel au niveau de liquide. Une carte d'acquisition et un logiciel permettent d'obtenir une mesure dynamique de la variation de tension entre les deux tiges.

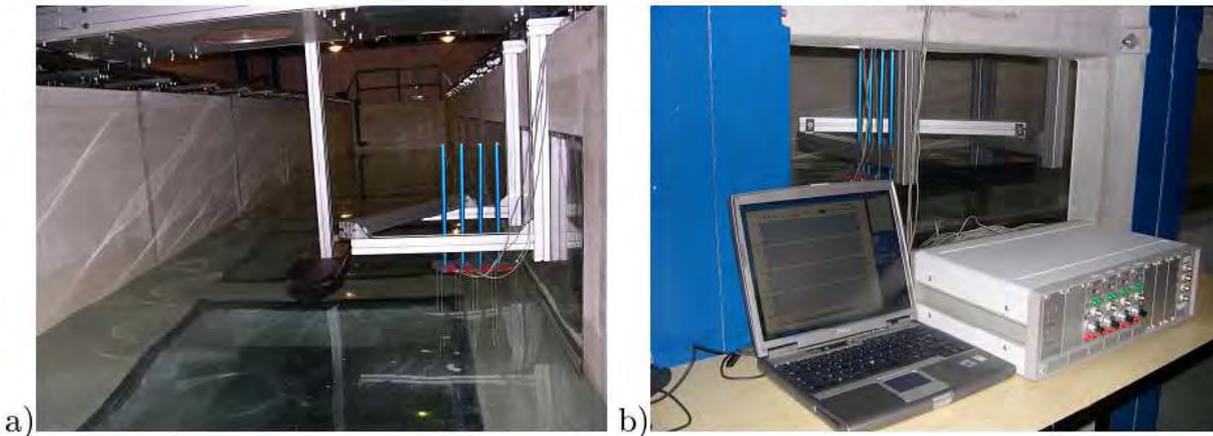


Figure 37 : Dispositif des sondes résistives : a) Sondes résistives ; b) Système d'acquisition

Le système d'acquisition utilisé permet de gérer quatre sondes simultanément. Pour chaque essai, la fréquence d'acquisition est fixée à 256 Hz et le déclenchement est géré en fonction de la position du bateau. La position de début d'acquisition reste la même pour tous les cas. Afin d'obtenir une cartographie précise du champ de vagues entre le bateau et le bord, nous réalisons plusieurs passages pour les mêmes jeux de paramètres en déplaçant les quatre sondes entre chaque passage. Nous réalisons ainsi six passages par vitesse, ce qui nous permet d'obtenir 24 positions de sondes pour les mêmes paramètres (Tableau E). Entre chaque passage, un

intervalle de temps d'environ trente à quarante cinq minutes est nécessaire pour que la surface libre retrouve un état de repos.

Numéro position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Position y (cm)	-15,4	-20,4	-25	-27.5	-30	-32.5	-35	-37.5	-40	-42.5	-45	-47.5
Numéro position	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Position y (cm)	-50	-51.5	-52.5	-55	-56.5	-57.5	-60	-61.5	-62.5	-66.5	-71.6	-73.7

*Tableau E : Position des sondes par rapport à l'axe du bateau*

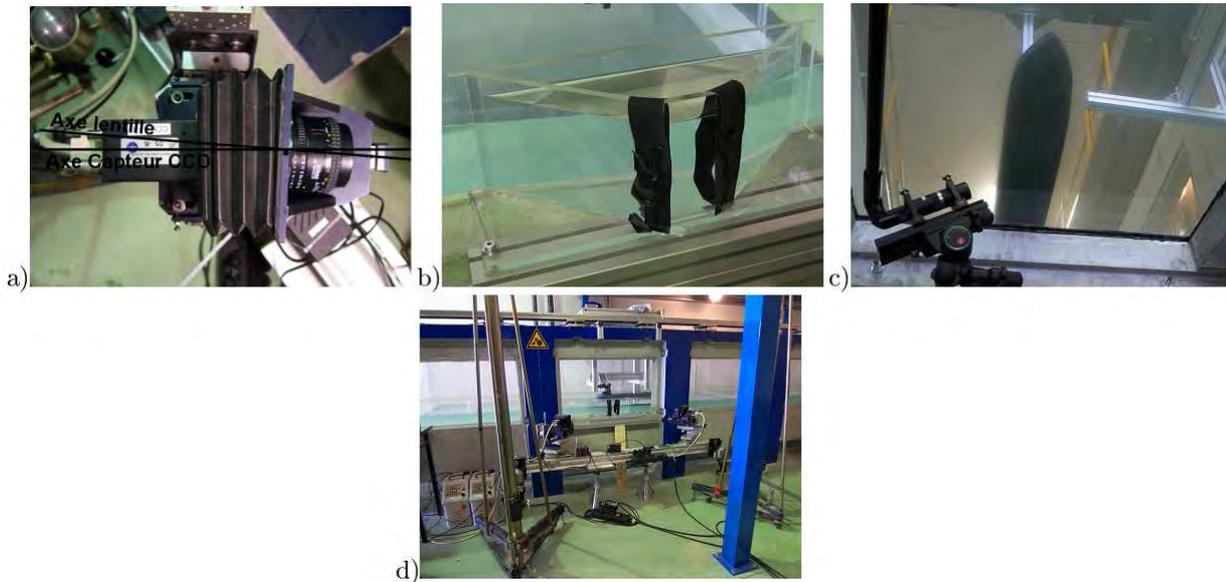
### **3.5.1.3 PIV stéréoscopique**

Afin de déterminer le champ de vitesse tridimensionnel de l'écoulement généré par le mouvement du bateau, une méthode de PIV stéréoscopique est utilisée. On s'appuie ici sur les travaux de thèse de Callaud (2003) pour décrire cette méthode.

Le bassin des carènes de l'institut PPRIME permet l'utilisation de méthode optique grâce aux hublots placés sur les côtés et le fond du bassin. De plus comme précisé précédemment, le niveau d'eau est fixé tel que sur les hublots latéraux une hauteur d'eau de 10 centimètres soit visible. C'est donc dans cette zone de mesure que sera déterminé le champ de vitesse.

L'acquisition des images est réalisée par deux caméras CCD JAI capables d'enregistrer deux images successives dans un intervalle de temps très court. La résolution des capteurs CCD est de 1600\*1200 pixels codés sur 8 bits. L'acquisition des doublés d'images est effectuée à une fréquence de 10 Hz. De plus pour obtenir des images entièrement nettes, les caméras sont réglées sur des tables de Scheimpflug (0.a). Pour minimiser les aberrations optiques provoquées par l'interface air-liquide, un prisme est placé contre la paroi et les axes optiques des caméras forment un angle droit avec les parois du prisme (0.b). Un laser Nd :Yag de la société Big Sky Laser/Quantel (modèle CFR 200PIV) a été utilisé pour créer la nappe laser. Ce type de laser est composé de deux cavités dont l'énergie maximale par pulse est de 120 mJ pour une largeur d'impulsion de 10 ns. Dans un premier temps, le laser avait été placé au même niveau que les caméras, en éclairant donc au travers des hublots latéraux. Dans cette configuration, les réflexions dues à l'interface entre l'eau et l'air étaient trop importantes au niveau de la surface libre. Les images issues de ces premières acquisitions étaient donc inexploitables. De telles réflexions peuvent également être préjudiciables pour les caméras CCD en endommageant les pixels des capteurs. Dans le but de minimiser ce phénomène, le laser a donc été placé sous le bassin en éclairant au travers des hublots situés sur le fond (0.c) et un algorithme de pré-traitement des images acquises a été développé. Au plus grandes vitesses étudiées, des réflexions sont tout de même présentes et affectent donc les résultats. Pour ensemencher le milieu étudié, le choix des particules est important. Ces dernières ont pour rôle d'être représentatives de l'écoulement. Elles ne doivent pas descendre trop rapidement vers le fond ou inversement remonter vers la surface dans le but d'avoir une bonne répartition de celles-ci sur les images. Les premières particules utilisées étaient trop légères et formaient une pellicule au niveau de la surface qui rendait les acquisitions inexploitables. Le choix a donc porté sur des particules d'un diamètre de cinq micromètres et d'une densité de 1,016 g/cm<sup>3</sup> qui ont fourni des résultats satisfaisants. Le système d'acquisition est géré par un logiciel de la société Dantec qui synchronise le laser et les caméras. Ce logiciel nous permet de régler les paramètres propres à chaque mesure comme l'intervalle de temps  $\Delta t$  entre les deux images successives ou la fréquence d'acquisition par exemple. Le déclenchement de l'acquisition est piloté par un boîtier de synchronisation extérieur qui envoie un signal au moment où le bateau passe à une position donnée. Ne connaissant pas à l'avance la vitesse du fluide pour les différents cas de mesure, une première acquisition est réalisée pour chaque jeu de

paramètres afin d'évaluer le  $\Delta t$ . Cette intervalle de temps est estimé afin d'obtenir des déplacements de particules d'environ huit pixels entre les deux images successives dans le but d'avoir le minimum d'erreur lors de la corrélation. Une fois ce paramètre déterminé, chaque acquisition est doublée. Comme pour les mesures de hauteurs, un temps de repos est observé entre deux passages pour que l'écoulement retrouve son état initial.



*Figure 38 : a) Caméra CCD JAI en configuration de Scheimpflug b) Prisme limitant les aberrations optiques c) Position du laser sous le bassin d) Vue d'ensemble du dispositif*

### **3.5.1.4 Conclusion**

Au cours de ce paragraphe, l'ensemble des outils expérimentaux a donc été exposé. Le choix des paramètres étudiés au cours de cette étude a été effectué en se basant sur des données de terrain et sur une similitude de Froude. Ainsi, l'influence de la vitesse et celle du tirant d'eau sont étudiées. Un système de sondes résistives a été utilisé afin de mesurer les champs de vagues autour de la maquette dans le bassin des carènes. Les méthodes d'acquisition et d'analyse des données de hauteurs de vagues ont été présentées. De plus, une validation des mesures effectuées à partir de ce dispositif a été réalisée. En ce qui concerne, les mesures des vitesses dans l'écoulement, une technique de PIV stéréoscopique a été utilisée. Dans un premier temps, les principes généraux de cette méthode ont été présentés, puis, dans une deuxième partie le dispositif expérimental à été exposé. Au cours de l'analyse des données obtenues par SPIV, une méthode de traitement d'images a été introduite. La détection de la surface libre sur les images enregistrées permet de réduire les erreurs commises sur la détermination du champ de vitesses. Pour valider cette méthode, la surface libre obtenue à partir des mesures SPIV peut être comparée à celle déterminée par les sondes résistives. Ce travail est présenté dans le paragraphe suivant qui expose les différentes caractéristiques de l'écoulement.

### 3.5.3 Caractérisation de l'écoulement généré par le passage d'un bateau

Dans cette partie, l'écoulement autour de la carène est étudié en détail pour une vitesse de 0,8 m/s, soit un nombre de Froude de 0,38, et un tirant d'eau de 9,3 cm. La mise en correspondance des résultats de hauteurs de vagues et de vitesse est réalisée afin de comprendre les différents phénomènes liés à l'écoulement. A partir des champs de vitesse obtenus aux différents temps d'acquisition, la structure tridimensionnelle de l'écoulement peut être reconstruite dans le repère défini précédemment. Tout d'abord, afin de s'assurer de la validité des résultats obtenus, nous les comparons aux mesures in situ réalisées par l'équipe de Rouen sur le site de Bardouville. Les mesures de vitesse sur site sont réalisées à partir d'une sonde ADV qui fournit les trois composantes de vitesse. Un capteur de pression au droit de la sonde ADV permet également d'obtenir le niveau d'eau au dessus du point de mesure (Figure 35a). Les variations de hauteur et de vitesse au passage d'un navire, dans le cas de mesures in situ et en laboratoire, sont représentées dans le but de comparer les deux types d'écoulement.

Les résultats issus des mesures de terrain présentés correspondent au passage d'un tanker de 140 mètres de long, 22 mètres de large avec un tirant d'eau de 6,5 mètres. Sa vitesse est de 13 noeuds, soit 6,7 m/s. En considérant une profondeur de 13 mètres dans la zone de mesure, le nombre de Froude se rapportant à ce bateau est d'environ 0,59.

Le premier phénomène observable est la diminution importante du niveau d'eau avant le passage du navire (0). Cette baisse est le résultat d'un courant de retour qui entraîne l'eau vers l'arrière du navire. Ce courant est visible sur les représentations de vitesse suivant  $x(0)$  où l'on note une augmentation dans le sens positif de  $x$  simultanément avec l'abaissement de la surface libre. Dans le cas des mesures en laboratoire, ces phénomènes sont beaucoup moins marqués mais également présents. L'écart entre les deux résultats peut s'expliquer par la différence des nombres de Froude et des rapports  $S_b/S$ , où  $S_b$  est la section immergée du bateau et  $S$  la section du canal. Dans notre cas, ce rapport est d'environ 2% contre 10% en réalité. L'augmentation de ce ratio comme du nombre de Froude entraîne un courant de retour plus important, et donc un abaissement plus conséquent. De plus, les topographies des berges de la Seine et celles du canal ne sont pas similaires. En effet, sur le site de Bardouville, l'acquisition des vitesses et des hauteurs est réalisée sur des berges de type plage. On note également que les valeurs du courant de retour et de l'abaissement du plan d'eau obtenues dans le bassin des carènes concordent avec l'application de l'équation de Schijf. En effet avec les dimensions du canal, cette équation nous donne une valeur de vitesse de 0,02 m/s et un abaissement de 2 millimètres. Dans le cas des acquisitions, la vitesse du courant de retour mesurée est également de 0,02 m/s et le niveau de la surface libre s'abaisse de 3 millimètres. Cet accord entre les différentes valeurs s'explique par le fait que l'écoulement dans le bassin des carènes respecte plusieurs hypothèses faites par Schijf notamment une profondeur et une largeur du canal constante. Après l'abaissement du niveau d'eau, les ondes de batillage génèrent des oscillations de la surface et des trois composantes de la vitesse (040). Les variations sur la hauteur comme sur la vitesse s'atténuent avec l'augmentation de la position suivant  $x$  pour les deux types de résultats (in situ et laboratoire). Dans le cas des mesures en laboratoire, cette diminution de l'amplitude est suivie d'une augmentation résultant d'une zone de réflexion des vagues sur les parois du bassin. Les résultats obtenus en laboratoire montrent donc des phénomènes similaires à ceux rencontrés au passage d'un bateau sur la Seine. Un courant de retour est suivi d'une succession d'ondes de batillage. Les mesures de terrain donnent accès aux trois composantes de vitesses et à la hauteur en un seul point. Les méthodes de mesures utilisées dans le bassin permettent d'obtenir un champ de vagues plus précis grâce au nombre important de points d'acquisition. De même, l'évolution des vitesses tridimensionnelles peut être observée dans un volume. Par rapport aux études de terrain, cette analyse nous apporte donc des informations complémentaires sur les caractéristiques de l'écoulement généré par les bateaux.

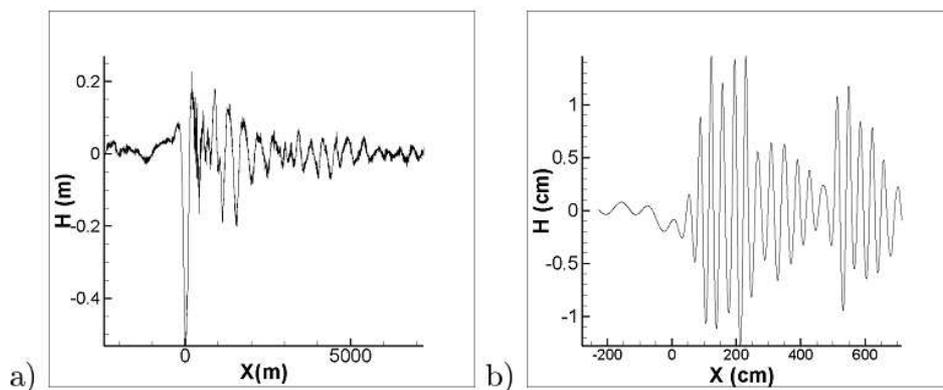


Figure 39 : Variation de niveau d'eau au passage d'un navire : a) Mesure sur la Seine à l'aide d'une sonde de pression ; b) Mesure en laboratoire à l'aide de sondes résistives

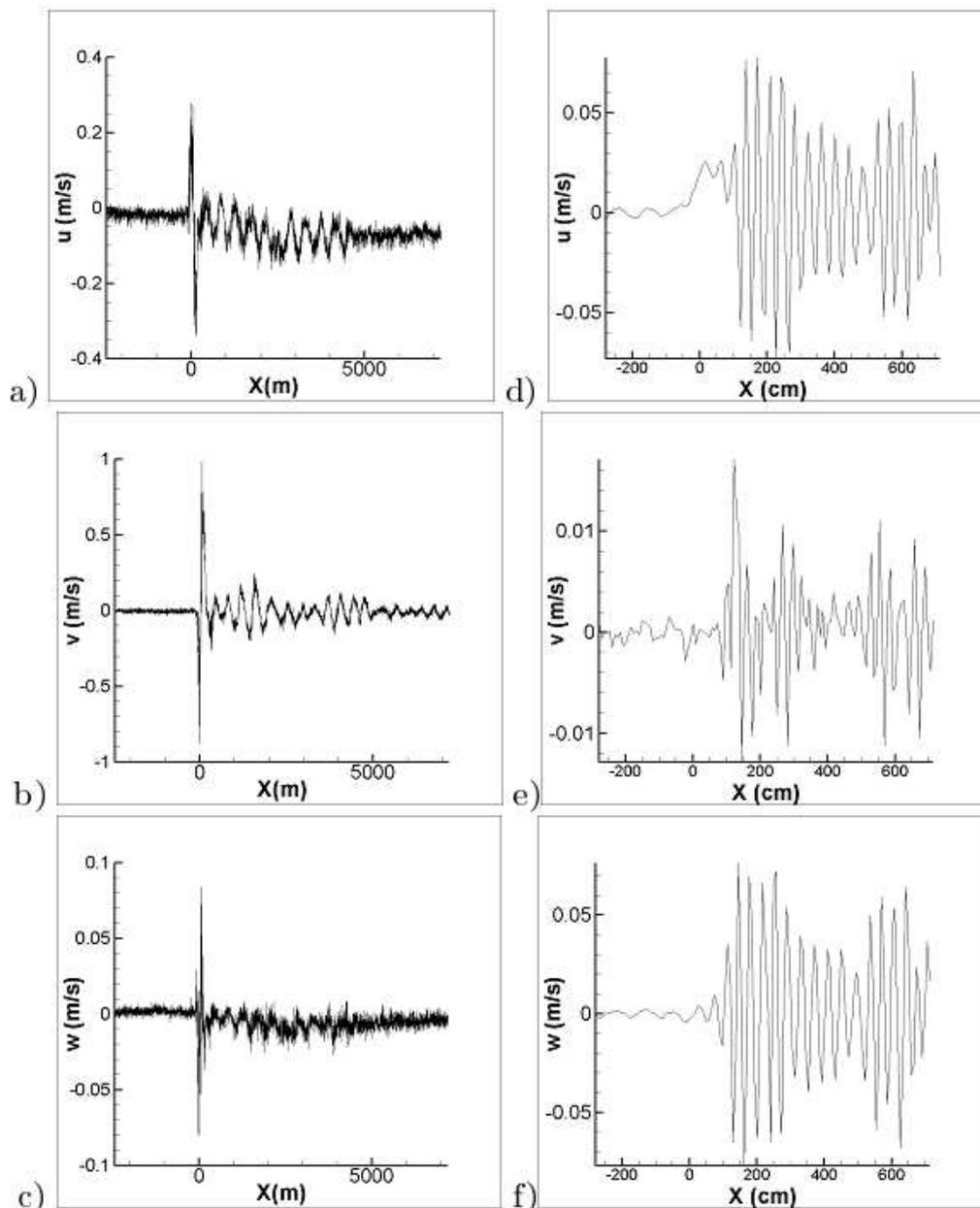


Figure 40 : Variation des trois composantes de vitesse au passage d'un navire : a) b) c) Mesure sur la Seine à l'aide d'une sonde ADV ; d) e) f) Mesure en laboratoire par SPIV

### 3.5.3.1 *Champ de vagues*

A partir des 24 positions de sondes, il est possible de reconstruire le champ de vagues autour du bateau (0). Au cours de cette étude, nous nous sommes essentiellement intéressés à la compréhension de l'écoulement dans une région se situant de l'avant du navire à la première zone de réflexion des vagues sur la paroi (0b).

Pour analyser le champ de vagues, nous nous appuyons sur le schéma fourni par Baw (2005) représentant le sillage autour d'un bateau. Le mouvement d'un navire provoque différentes perturbations hydrauliques. A l'avant, une onde de proue est formée. Elle résulte du courant de retour qui ramène vers l'arrière du bateau le volume d'eau chassé à l'avant. L'opposition du courant de retour à l'avancée du navire génère deux centres de pression, à l'avant et à l'arrière du bateau. Il en découle l'apparition de vagues divergentes et transversales. Ces deux types d'ondes sont représentés autour de la carène en s'appuyant sur la représentation du champ de vagues en couleur (041.c). De plus, l'interaction entre les ondes divergentes et transversales engendre une ligne d'interférence marquée par des hauteurs de vagues plus importantes. Ce phénomène est observable à la proue et à la poupe du navire et représenté par les lignes discontinues (0.c). Dans la zone avant l'impact des vagues sur la paroi (environ 110 centimètres), l'amplitude des ondes divergentes diminue avec l'augmentation de la distance par rapport à la ligne d'avancée du navire. Le suivi du niveau de crête d'une de ces vagues permet de mettre en évidence ce phénomène (0.d.). Le niveau augmente d'abord pour atteindre un maximum qui correspond à la ligne d'interférence des ondes divergentes et transversales puis diminue avec l'augmentation de la distance au bateau. On note également que la zone d'impact des vagues se traduit par des amplitudes plus élevées proche de la paroi.

Le système de vagues généré par le mouvement d'un bateau est également défini par des angles caractéristiques : l'angle  $\beta$  entre la crête des vagues divergentes et l'avancée du navire, et l'angle  $\alpha$  entre la ligne d'interférence et la direction d'avancée. Grâce à un repérage des crêtes et des creux dans le champ de vagues autour du navire, il est possible d'évaluer l'angle  $\beta$  graphiquement. Pour les paramètres étudiés ici, sa valeur est d'environ  $54^\circ$  et est donc proche de la valeur théorique fournie par Baw (2005) de  $54,74^\circ$ . En ce qui concerne la mesure de l'angle  $\alpha$ , elle peut être estimée à partir de la représentation du champ de vagues en couleur (0.f). Ici, on obtient un angle d'environ  $21^\circ$ . La valeur théorique introduite par Kelvin étant de  $19,47^\circ$ , on se trouve dans le même ordre de grandeur. Les mesures de hauteur de vagues réalisées dans le bassin donnent donc des résultats cohérents avec les descriptions du sillage des bateaux faites dans la littérature. Le système d'ondes divergentes et transversales ainsi que les valeurs des angles coïncident avec ces représentations.

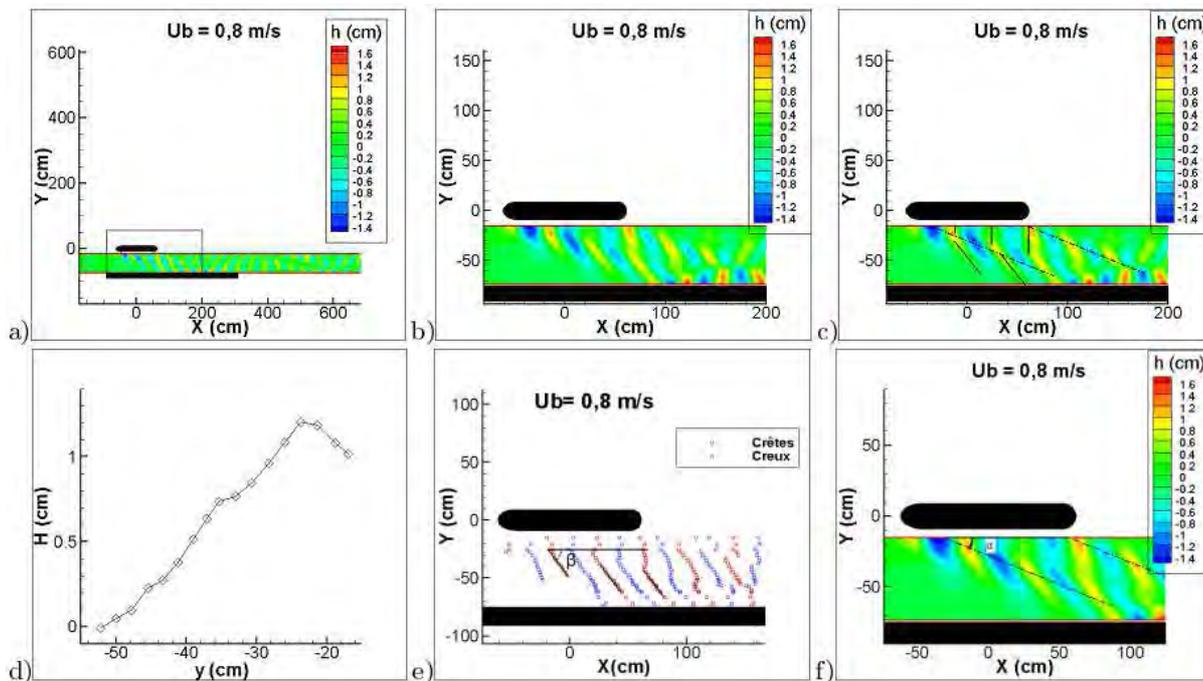


Figure 41 : Hauteurs de vague mesurées à partir des sondes résistives : a) Totalité du champ de vagues b) Parti du champ étudié c) Représentation des différentes vagues d) Suivi du niveau de crête e) Angle  $\beta$  f) Angle  $\alpha$

### 3.5.3.2 Champ de vitesses

A partir de l'ensemble des plans d'acquisition SPIV, un volume comprenant le champ de vitesse tridimensionnel autour de la carène est reconstruit. Dans le but d'étudier l'évolution spatiale de l'écoulement, différentes coupes suivant les trois axes du repère sont réalisées.

#### 3.5.3.2.1 Plan transversal

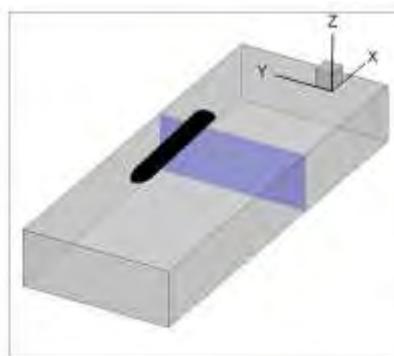
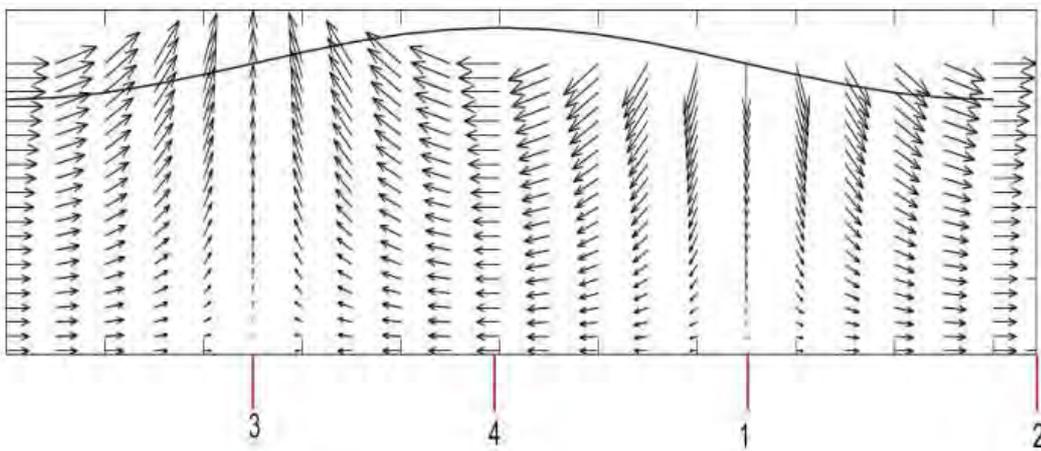


Figure 42 : Plan transversal YZ

Dans le plan (0), c'est à dire le plan de mesures, les résultats obtenus par SPIV sont couplés avec les hauteurs de vagues mesurées à partir des sondes résistives (0). La correspondance et l'évolution des surfaces libres fournies par les deux méthodes sont acceptables. Il existe cependant un léger décalage qui peut s'expliquer par des erreurs liées à la calibration des deux systèmes ou au traitement réalisé sur les images SPIV. En effet, sur certaines images comprenant des zones de réflexions la détection de la surface libre est difficile comme expliqué dans le paragraphe précédent. La coïncidence des deux techniques permet tout de même de valider les algorithmes de traitement d'images détectant la surface libre.

L'évolution des vitesses dans le plan peut être comparée avec l'écoulement théorique sous une vague selon le modèle d'Airy (0). Les vecteurs vitesse mesurés assez loin de la paroi correspondent à cette représentation théorique.

En effet, dans la première phase de décroissance correspondant au temps 1 sur la Figure 38, les vecteurs vitesse sont orientés vers le bas (044.a). Le niveau de la surface libre diminue alors. La deuxième image correspond au creux de la vague (044.b), c'est à dire au temps noté 2 sur la représentation théorique. Le niveau est au plus bas et les vecteurs vitesse sont pointés dans le sens contraire à la propagation de la vague avec une trajectoire circulaire. Au temps suivant, les vecteurs vitesse sont dirigés vers le haut et pointent vers la même direction (04.c). Cette zone correspond à la zone de croissance de la vague où le niveau d'eau commence à augmenter. Enfin l'image suivante (0.d) se rapporte à la crête de la vague (temps 4). Les vecteurs sont orientés dans le sens de la propagation de l'onde avec une trajectoire circulaire et la surface libre est au plus haut. Cependant, contrairement à la représentation théorique, le champ de vitesse mesuré comporte trois composantes. Ce fait peut s'expliquer par l'angle entre le plan de mesure et la propagation de la vague. Ici, loin de la paroi, les composantes  $u$  et  $v$  ont la même évolution. On peut supposer que si le plan laser était orienté dans le sens de propagation de l'onde, le champ de vitesse serait bidimensionnel. En revanche, près de la paroi, les vecteurs vitesse évoluent différemment. La composante suivant  $y$ , donc perpendiculaire à la paroi devient quasiment nulle. Cette perte est répercutée par une augmentation des composantes suivant  $x$  et  $z$ , c'est à dire sur les vitesses parallèles à la paroi.



*Figure 43 : Représentation théorique du champ de vecteurs sous une vague se propageant de droite à gauche*

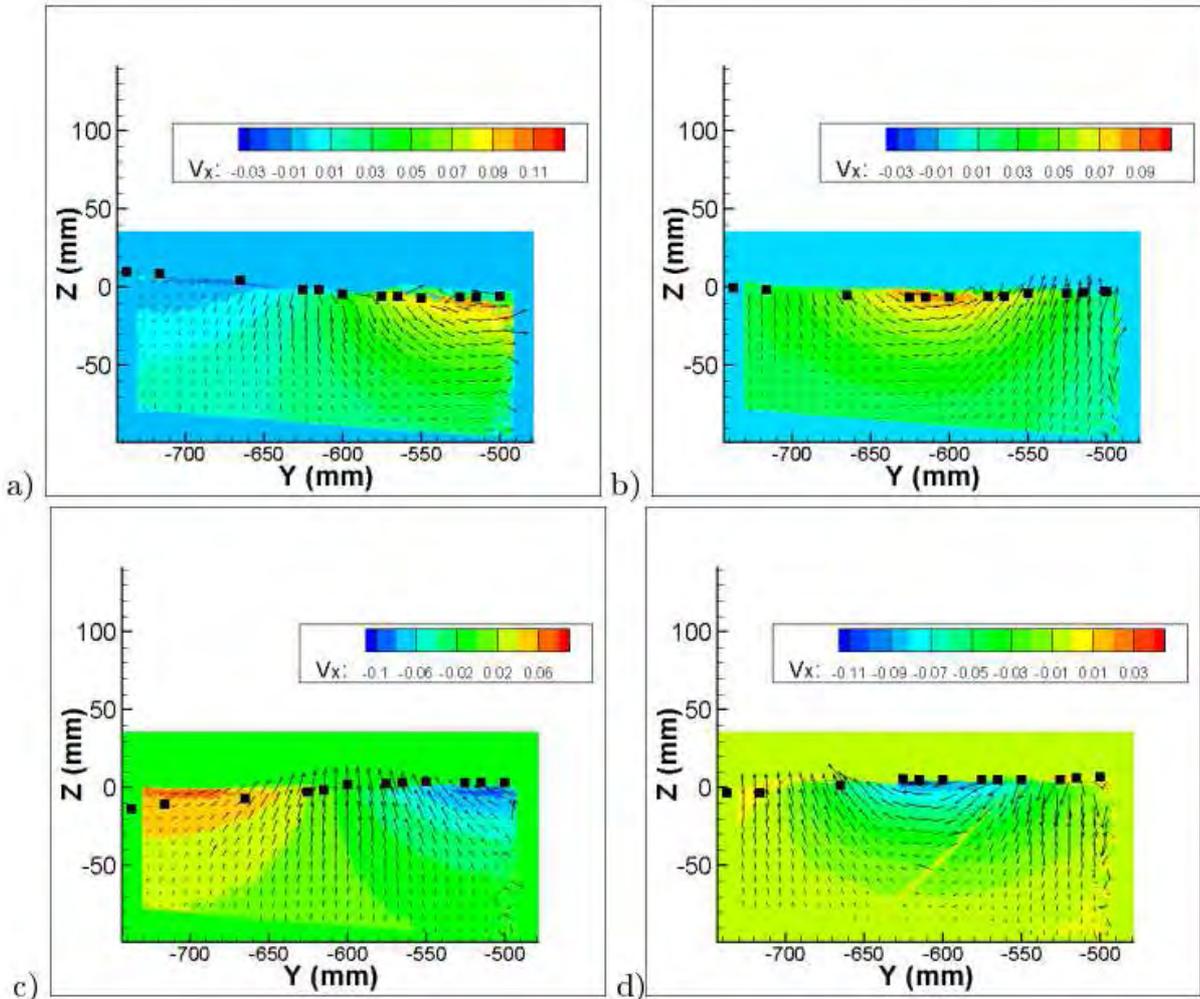


Figure 44 : Champs de vecteur mesuré par SPIV dans le plan YZ à quatre instants successifs

### 3.5.3.2 Plan longitudinal horizontal

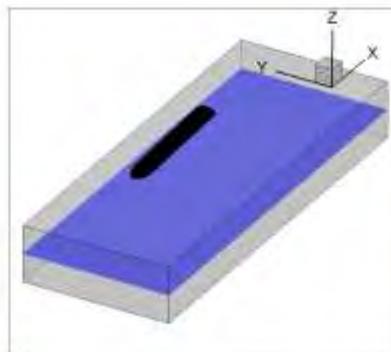


Figure 45 : Plan longitudinal horizontal XY

Dans ce plan (0), nous visualisons les composantes de vitesse ainsi que la norme de la vitesse séparément pour différentes profondeurs. Ces représentations sont mises en relation avec les mesures de hauteur de la surface libre dans la même zone (0). Pour une profondeur de 2 centimètres sous la surface, les résultats SPIV sont couplés avec les mesures fournies par les sondes résistives en représentant pour chaque composante la position des crêtes des vagues, ceci dans le but de comprendre au mieux l'évolution des vitesses avec celle de la surface libre (0). Assez loin de la paroi, les composantes  $u$  et  $v$  ont le même signe comme précisé dans l'analyse du plan ZY. Leurs valeurs sont négatives et donc orientées dans le sens de la propagation de la vague au niveau de la crête (0.a, b). Ces observations sont cohérentes avec l'évolution théorique des vitesses sous une vague. Il en est de même pour la vitesse horizontale. Le passage d'une crête marque un changement de signe de  $w$  (0.c). Dans la

phase de croissance (avant la crête), cette composante est positive et devient négative dans la phase de décroissance (après la crête). Le changement de signe inverse au niveau de  $w$  (négatif/positif) correspond donc au passage d'un creux. Avant environ 110 centimètres, c'est à dire avant que les vagues n'impactent la paroi, les composantes de vitesse diminuent avec la distance par rapport au bateau. Ce phénomène est également visible sur la représentation de la norme. Dans cette zone, la même évolution est logiquement présente sur les hauteurs de vagues qui décroissent avec la distance au navire.

Près de la paroi, la composante  $v$  diminue fortement en raison à l'obstacle que celle-la représente. Cette diminution se traduit par une augmentation des valeurs sur  $u$  et  $w$ , notamment dans la zone où les vagues impactent la paroi. Cette zone est également mise en évidence par la représentation de la norme (0.d). Le maximum de la norme de vitesse se situe au niveau du point de réflexion des vagues sur la paroi.

Les mêmes représentations que pour une profondeur de  $z=-2$  cm sont réalisées pour des valeurs de  $z=-5$  cm (0) et  $z=-8$ cm (0). A 5 centimètres sous le niveau de la surface au repos, les composantes de vitesse diminuent fortement par rapport à celles constatées à 2 centimètres. On retrouve néanmoins les mêmes allures de profil de vitesse. Seule la largeur des zones de même signe est plus importante dans ce cas. Cela s'explique par la nature orbitale du champ de vecteurs sous la vague. A 8 centimètres sous le niveau d'eau, la vitesse est quasiment nulle et l'on ne distingue presque plus les effets du passage des ondes.

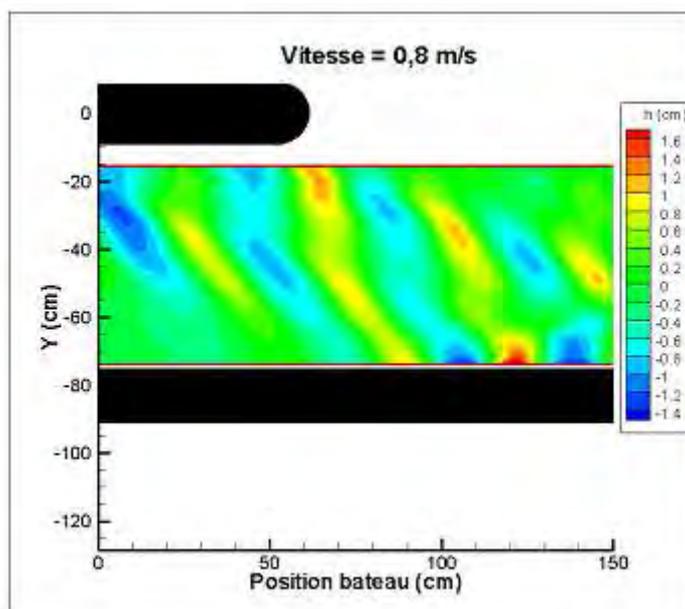


Figure 46 : Représentation du niveau de la surface libre dans la zone étudiée

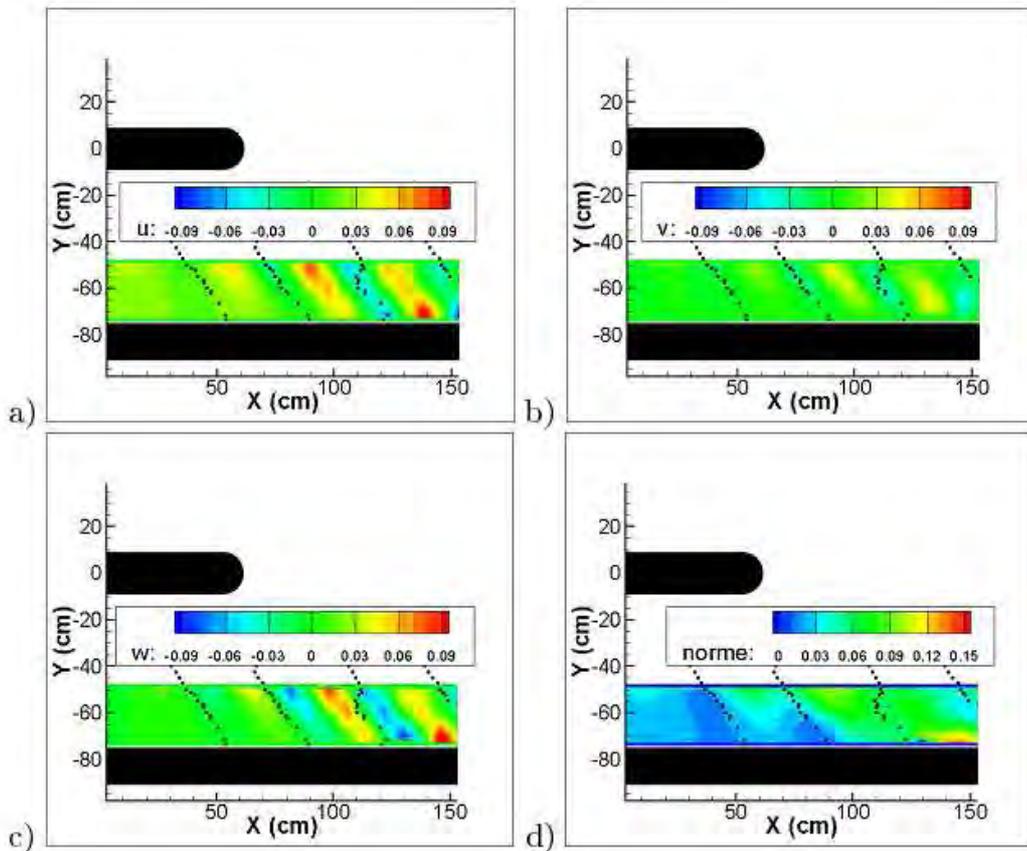


Figure 47 : Valeurs des différentes composantes de vitesse dans le plan XY pour  $z=-2$  cm couplées à la représentation des crêtes des vagues : a) composante u, b) composante v, c) composante w, d) norme de la vitesse

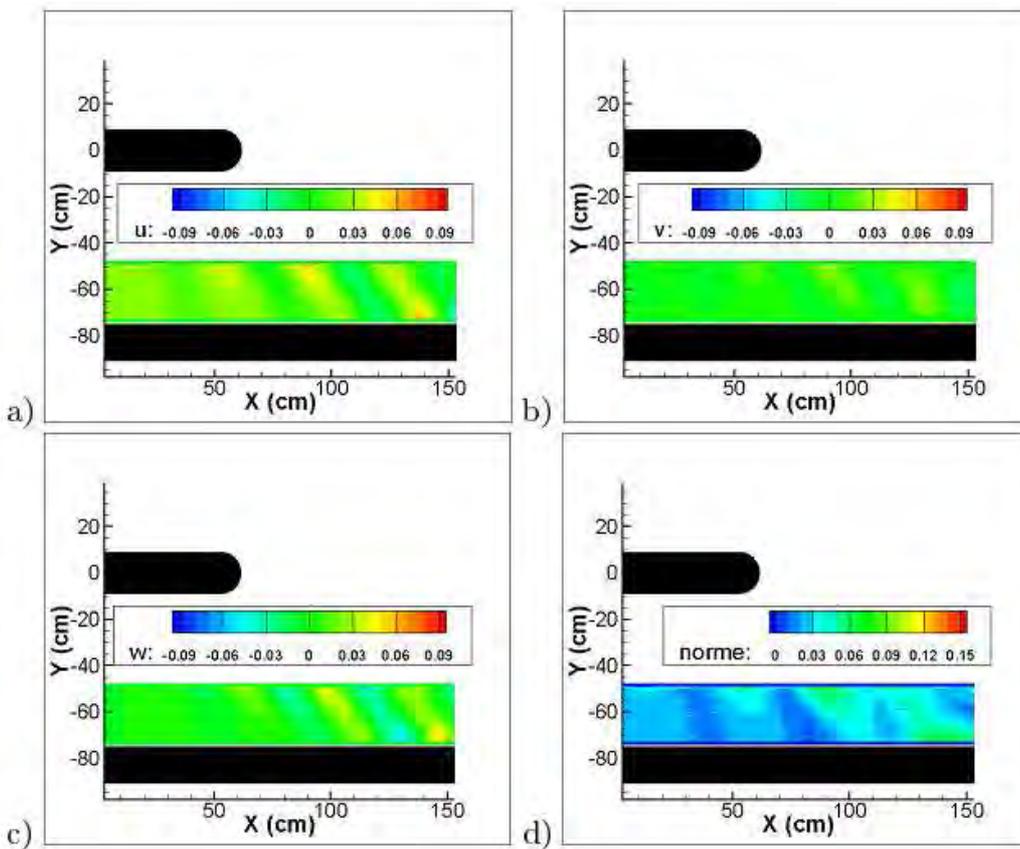


Figure 48 : Valeurs des différentes composantes de vitesse dans le plan XY pour  $z=-5$  cm

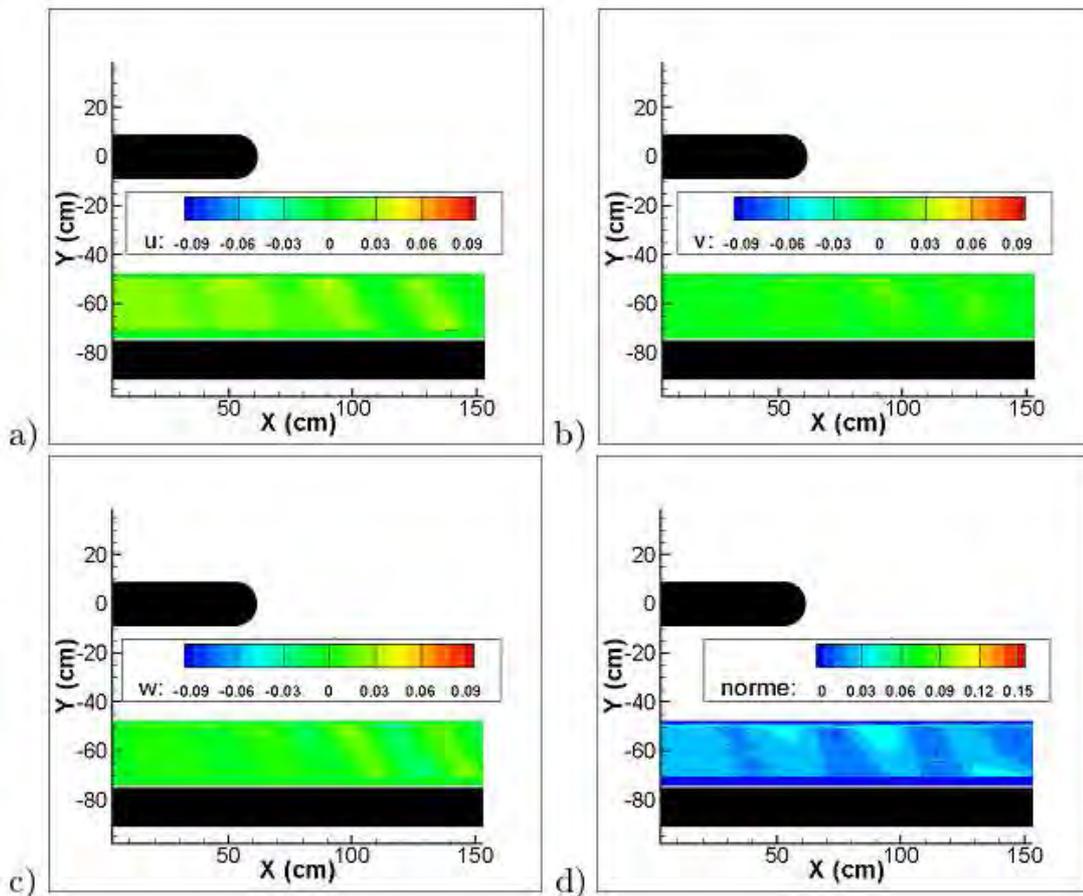


Figure 49 : Valeurs des différentes composantes de vitesse dans le plan XY pour  $z=-8$  cm

### 3.5.3.2.3 Plan longitudinal vertical

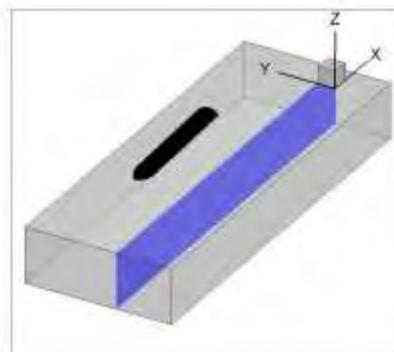


Figure 50 : Plan longitudinal horizontal XY

Ce plan est parallèle à la paroi du bassin (0). Pour visualiser l'évolution de la vitesse dans ce plan, trois coupes correspondantes à trois valeurs de  $y$  sont représentées. Pour  $y=-54$  cm (0), les changements de signe dus aux passages des vagues sont visibles sur les trois composantes de vitesse. Les vitesses les plus élevées se trouvent proche de la surface libre puis elles diminuent avec la profondeur comme constatée sur les plans précédents.

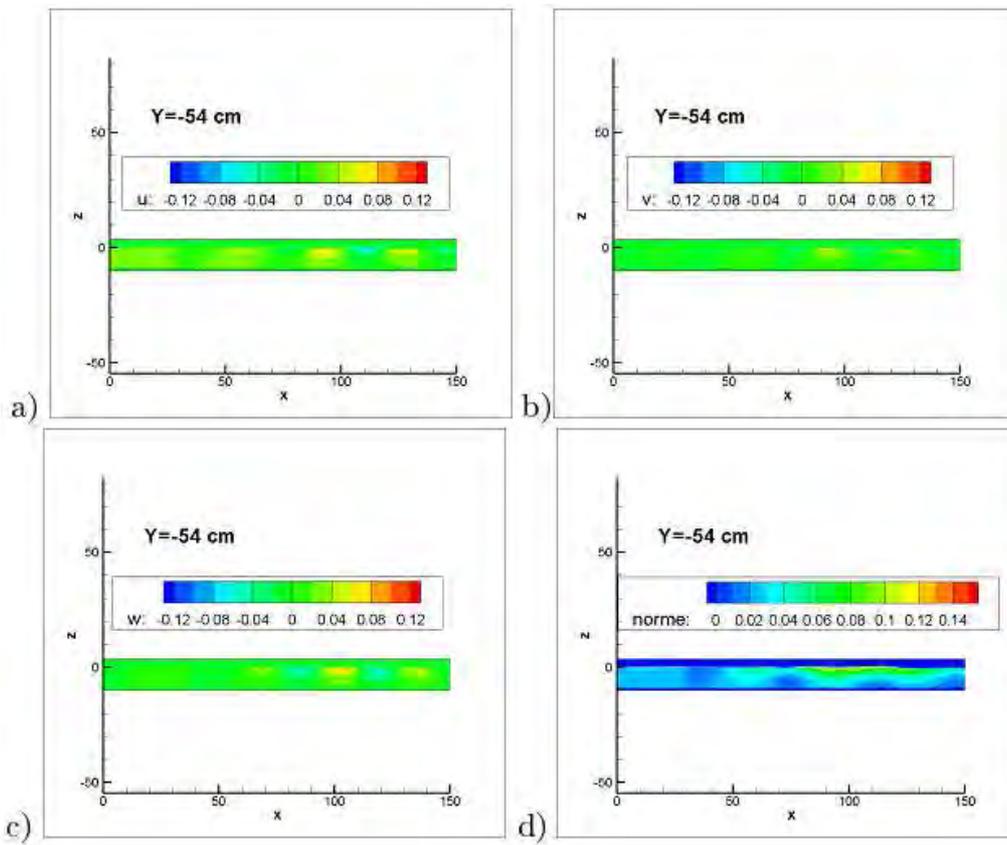


Figure 51 : Valeurs des différentes composantes de vitesse dans le plan XZ pour  $y = -54$  cm

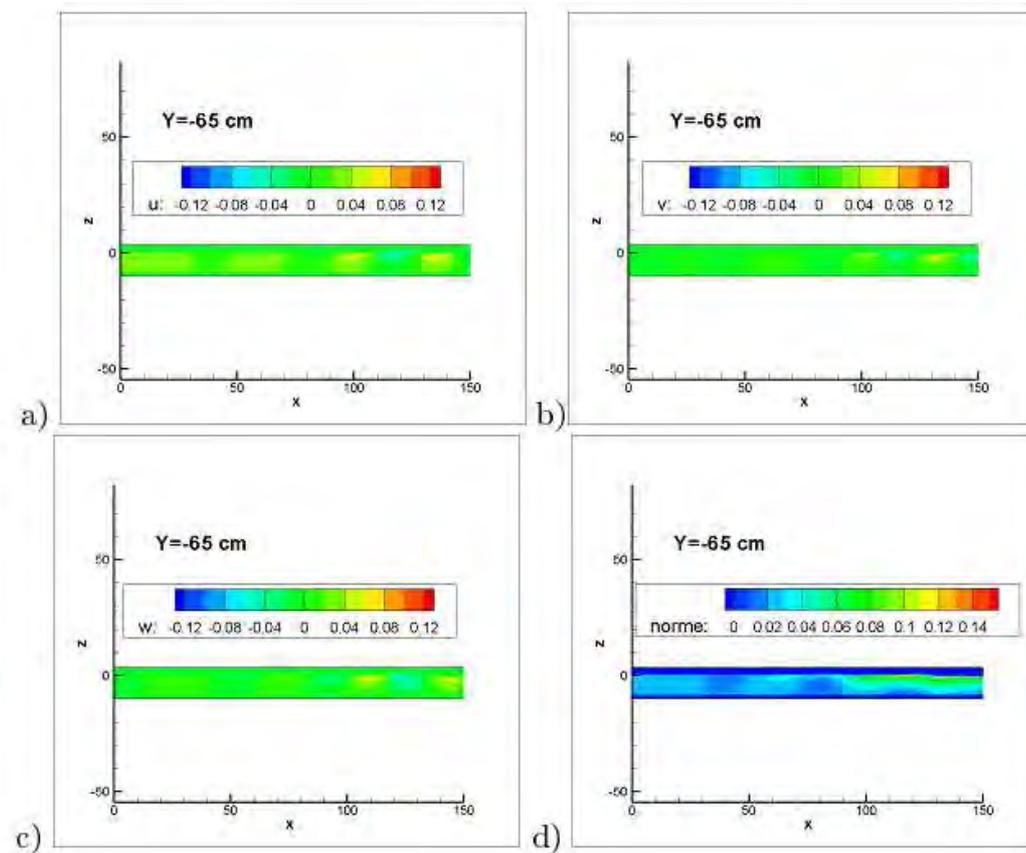


Figure 52 : Valeurs des différentes composantes de vitesse dans le plan XZ pour  $y = -65$  cm

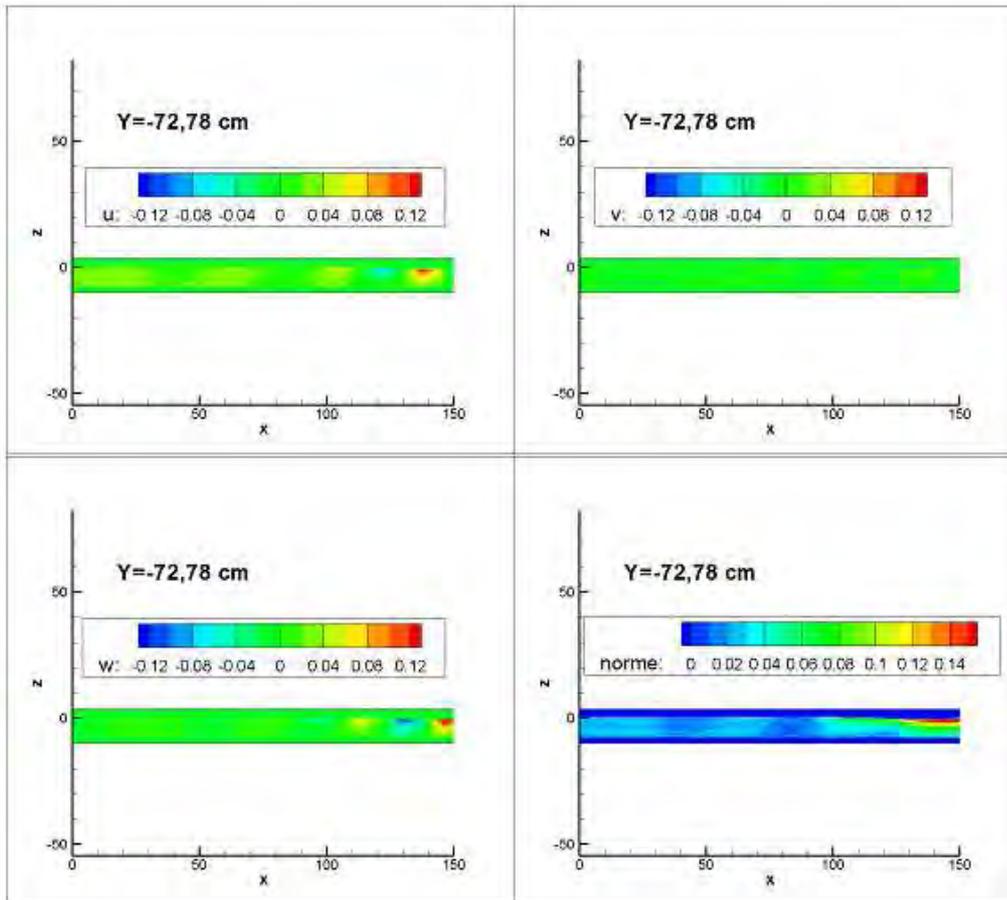


Figure 53 : Valeurs des différentes composantes de vitesse dans le plan XZ pour  $y=-72,78$  cm

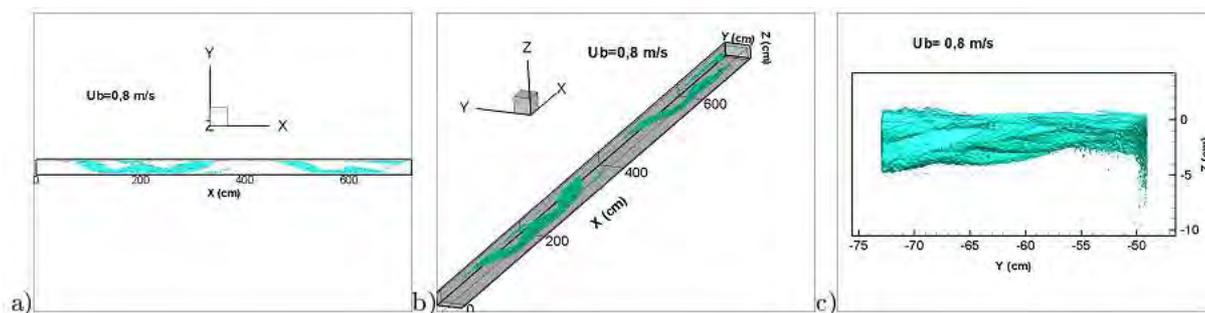
Sur le plan suivant,  $y = -65$  cm (0), l'évolution est la même que précédemment, chaque vague est marquée par un changement de signe. Les valeurs de vitesse pour les trois composantes et la norme sont plus faibles du fait de l'éloignement au navire. De plus, les structures se sont décalées vers la droite en raison de l'angle des vagues.

La dernière visualisation (0) correspond au plan de mesure le plus proche de la paroi. Ici, comme décrit précédemment, la composante de vitesse  $v$ , perpendiculaire à la paroi, est nulle et les deux autres composantes augmentent fortement. Ce phénomène est en particulier observé dans la zone d'impact des vagues où se trouve le maximum de la norme. On peut donc penser que c'est dans cette région que l'action érosive des vagues aura la plus grande importance.

### 3.5.3.3 Bilan

Dans ce paragraphe, les caractéristiques de l'écoulement ont été décrites. Les champs de vagues mesurés en laboratoire sont cohérents avec les descriptions théoriques du sillage derrière un bateau. Les valeurs des angles  $\beta$  et  $\alpha$  concordent avec la théorie et les différents phénomènes hydrauliques liés au mouvement d'un bateau ont été identifiés. En ce qui concerne les vitesses, la comparaison avec le profil de vitesse théorique sous une vague a été effectuée. L'évolution de l'écoulement dans le plan de mesures au passage d'une vague correspond à la théorie dans la zone proche du bateau. Cet écoulement est modifié par la présence de la paroi. La vitesse suivant  $x$  diminue alors fortement à proximité de la paroi et inversement les vitesses suivant  $x$  et  $z$  augmentent. Chaque vague est marquée par des changements de signe des trois composantes de la vitesse. On peut penser que ce processus est en partie responsable de l'érosion causée par le passage des bateaux en remettant en suspension les sédiments. Pour résumer les caractéristiques de l'écoulement, une représentation tridimensionnelle des iso-surfaces de la norme est présentée (0). La valeur de la surface représentée a été évaluée à partir des valeurs moyennes dans l'écoulement et est égale à 0,08 m/s. Les hauteurs et les vitesses maximales se trouvent dans la

région où les vagues impactent la paroi (0.a,b). Ces vitesses sont essentiellement concentrées dans la partie supérieure de l'écoulement, c'est à dire dans la zone proche de la surface libre (0.c). L'érosion liée aux ondes de batillage aura donc essentiellement lieu dans cette zone.



**Figure 54 : Iso-surface de la norme de vitesse : a) Vue de dessus ; b) Vue 3D; c) Vue transversale**

De plus, dans ce paragraphe, la mise en relation des champs de vitesse avec les mesures de hauteurs de vagues a donné des résultats satisfaisants. Les positions des surfaces libres obtenues avec les deux méthodes coïncident. Ces résultats valident ainsi les techniques de mesures et les algorithmes de traitements d'images implémentés dans le but de détecter la surface libre. L'étude de cet écoulement nous a donc permis de comprendre et de visualiser les différents processus liés à l'évolution des ondes de batillage. L'influence des deux paramètres, vitesse et tirant d'eau, sur les caractéristiques de l'écoulement est maintenant analysée.

### 3.5.4 Influence des paramètres étudiés

Les caractéristiques générales de l'écoulement généré par le mouvement d'un navire ont été détaillées au paragraphe précédent. L'étude bibliographique a mise en évidence le fait que les propriétés de l'écoulement induit par les bateaux dépendent d'un grand nombre de paramètres. Ces facteurs sont liés aux caractéristiques du navire (longueur, forme...) et à la morphologie du canal (profondeur, type de berge...). Au cours de cette étude, l'influence de la vitesse du bateau et celle du tirant d'eau ont été retenues. Les valeurs des paramètres ont été définies au paragraphe 2, en s'appuyant sur une similitude de Froude et sur des données du Port Autonome de Rouen afin d'être représentatives de la réalité.

L'objectif de cette partie est d'analyser l'impact de la vitesse et du tirant d'eau sur les propriétés de l'écoulement. A la lecture des travaux réalisés dans le but de relier le batillage à l'érosion, des grandeurs caractéristiques du sillage des bateaux ont été mises en évidence. Ainsi, dans cette partie, les vitesses au sein de l'écoulement sont déterminées. Les hauteurs de vagues impactant la paroi et leurs fréquences sont également calculées en fonction des deux paramètres pris en compte. Dans un premier temps, l'influence de la vitesse est décrite à l'aide de visualisations du champ de vagues généré par le bateau. L'impact de la vitesse du navire sur l'écoulement et sur les caractéristiques du champ de vagues est ensuite exposé. L'effet du tirant d'eau sur les propriétés des ondes de batillage est également analysé.

#### 3.5.4.1 Introduction de l'étude paramétrique

En introduction à l'étude paramétrique de l'écoulement, des visualisations de vagues générées par la maquette sont réalisées à l'aide d'un appareil photographique (0). Ici, les images correspondant à un tirant d'eau de 9,3 centimètres sont présentées pour les cinq vitesses de navires étudiées. Ces clichés permettent d'obtenir une première notion de l'influence de la vitesse du bateau sur les caractéristiques de l'écoulement. Pour la vitesse la plus faible, soit 0,5 m/s, le champ de vagues n'est pratiquement pas visible à l'oeil nu (Figure 55.a). La différence d'allure du sillage entre cette valeur et la valeur supérieure de 0,7 m/s est assez importante. L'amplitude des vagues semble être plus importante et le point de réflexion de vagues sur la paroi peut être visualisé (Figure 55.b). Pour les vitesses supérieures, ce point est clairement défini. L'amplitude des vagues augmente avec la vitesse du navire et leur impact sur la paroi semble plus conséquent. De plus, on note que pour des vitesses inférieures à 0,9 m/s les vagues paraissent « lisses » au contraire de celles générées à 0,9 m/s et 1 m/s. En effet, à ces vitesses les premières vagues déferlent. Ce phénomène est plus marqué pour la vitesse la plus importante.

L'influence du tirant d'eau est étudiée en fonction du volume d'eau déplacé par le bateau. En effet, en augmentant la valeur du tirant d'eau, donc en enfonçant le bateau, le volume d'eau déplacé est plus important (0). On peut donc s'attendre à constater des amplitudes de vagues plus grandes avec l'accroissement de ce paramètre.

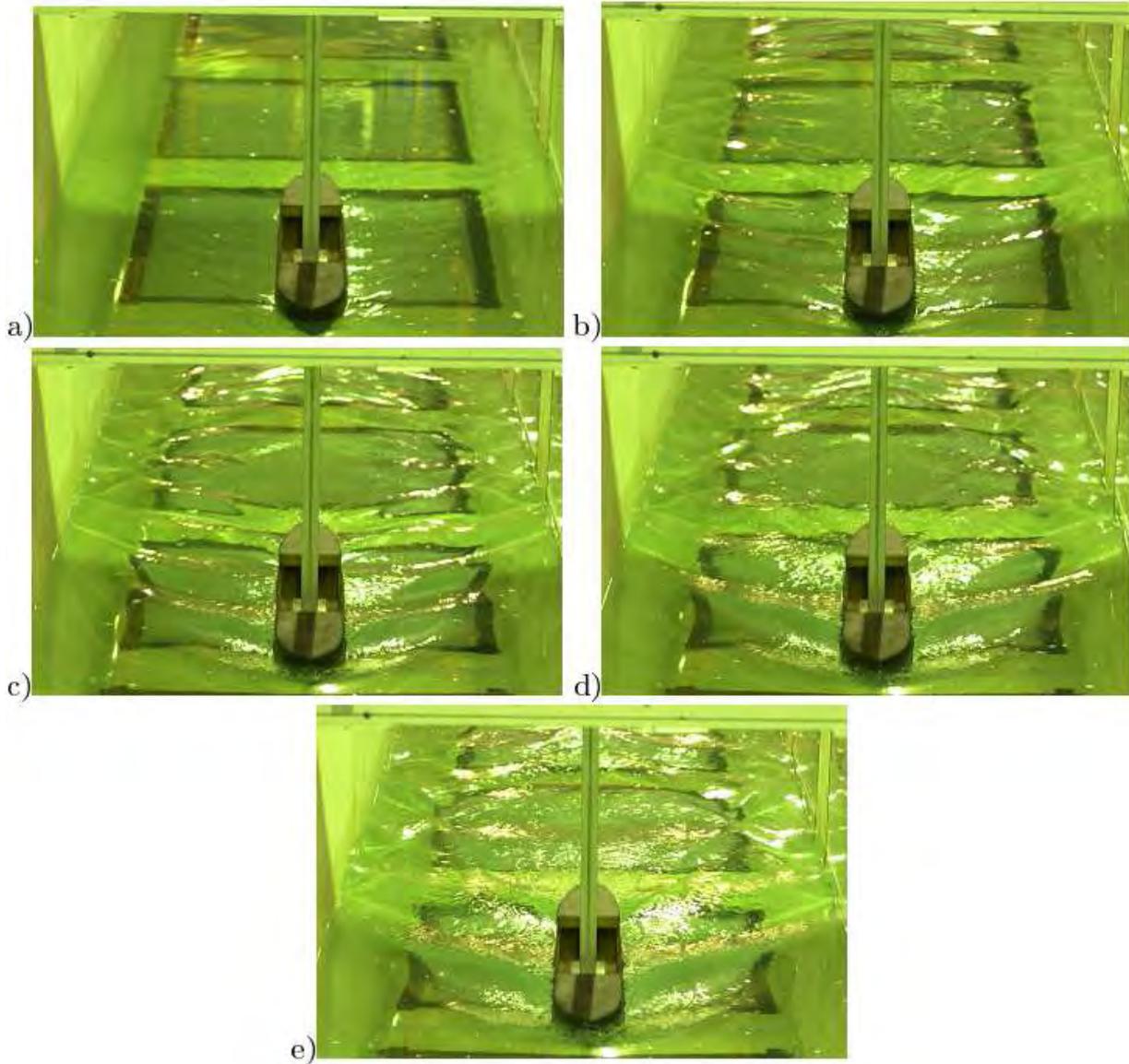


Figure 55 : Visualisation des vagues générées par la maquette : a)  $U_b=0,5$  m/s ; b)  $U_b=0,7$  m/s ; c)  $U_b=0,8$  m/s ; d)  $U_b=0,9$  m/s ; e)  $U_b=1$  m/s

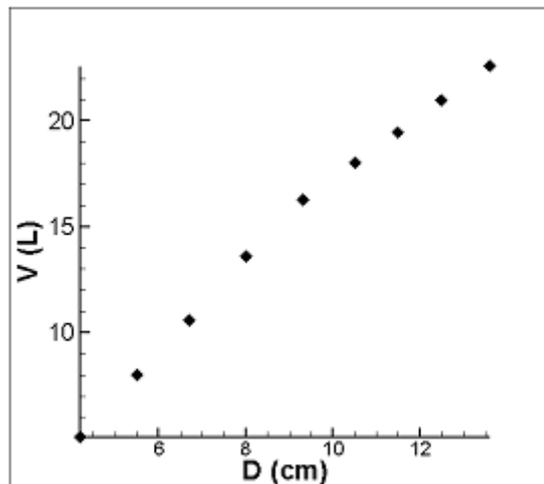


Figure 56 : Evolution du volume d'eau déplacé en fonction du tirant d'eau

### 3.5.4.2 Influence de la vitesse du navire

Pour étudier l'influence de la vitesse, donc du nombre de Froude, les champs de vagues pour un tirant d'eau de 9,3 centimètres sont représentés (0). Pour une vitesse de 0,5 m/s, le champ de vagues n'est pas clairement défini (0a). Dans ce cas, les hauteurs sont en grande partie inférieures au millimètre, ce qui correspond à la résolution des mesures réalisées à l'aide des sondes résistives. Dans les autres cas, l'augmentation de la vitesse du navire entraîne des changements de caractéristiques des champs de vagues. Plus la vitesse du navire est élevée, plus l'amplitude des ondes est importante. On remarque également que le nombre de vagues autour du modèle diminue avec la vitesse d'avancée.

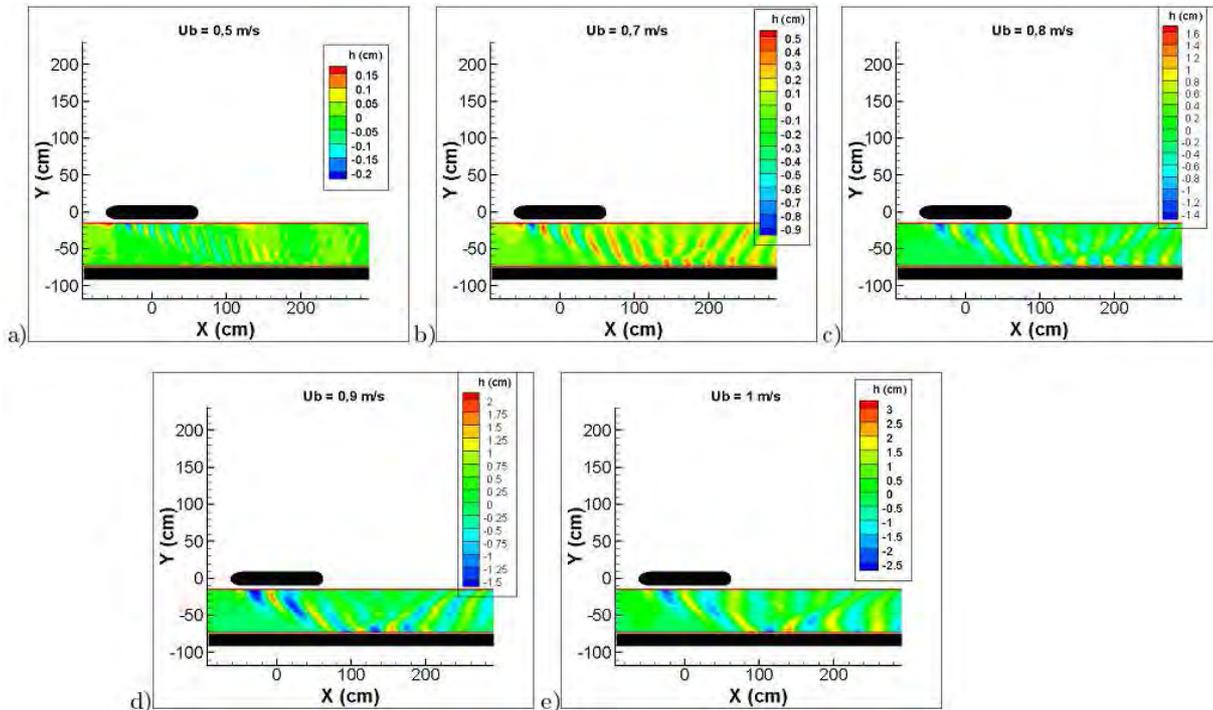


Figure 57 : Champs de vagues pour différentes vitesses de navire  $U_b$ .

A partir de ces représentations, il est possible d'évaluer la position du point de réflexion des vagues sur la paroi en fonction du nombre de Froude (0). Ce point est déterminé en repérant la position de la vague la plus haute proche de la paroi. Cette position en  $x$  diminue avec l'augmentation du nombre de Froude. Cela peut s'expliquer par l'augmentation de l'amplitude des vagues engendrées avec l'accroissement de la vitesse. En effet, pour de faibles vitesses, les premières vagues sont moins hautes et s'atténuent plus rapidement contrairement aux vitesses plus élevées où les vagues viennent impacter la paroi plus tôt. En suivant le niveau d'eau le long de la crête d'une vague, ce phénomène peut être visualisé. Ici, nous représentons le niveau de la crête de la première vague située autour du bateau (0). La forme de ces vagues est semblable pour chaque vitesse. On observe d'abord une phase de croissance jusqu'à un maximum correspondant à la ligne d'interférence des ondes divergentes et transversales, puis une phase de décroissance de la vague. Avec l'accroissement de la vitesse du navire, la hauteur maximale augmente.

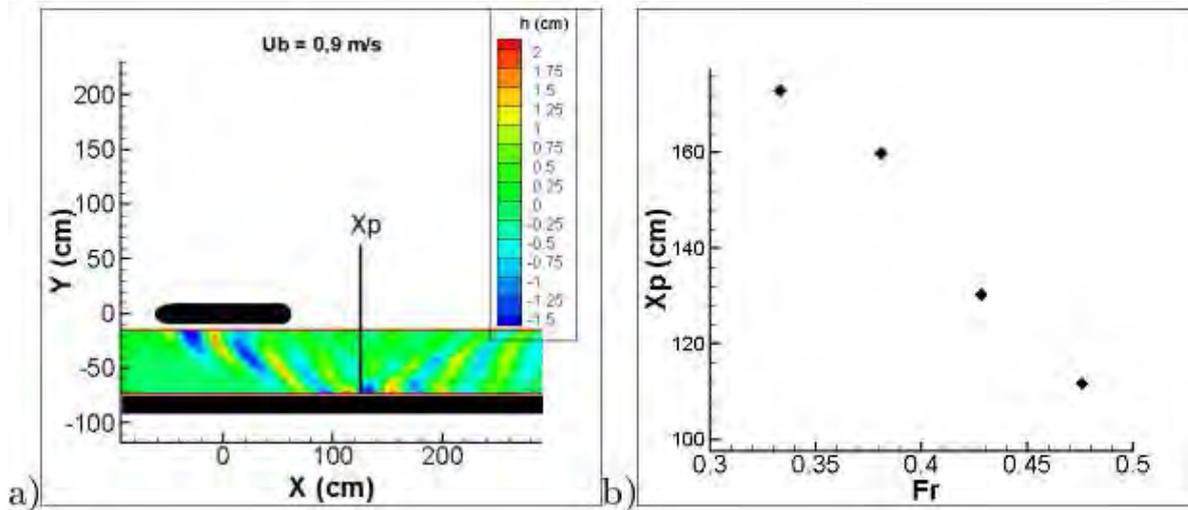


Figure 58 : a) Evolution de la position du point de réflexion en fonction du nombre de Froude

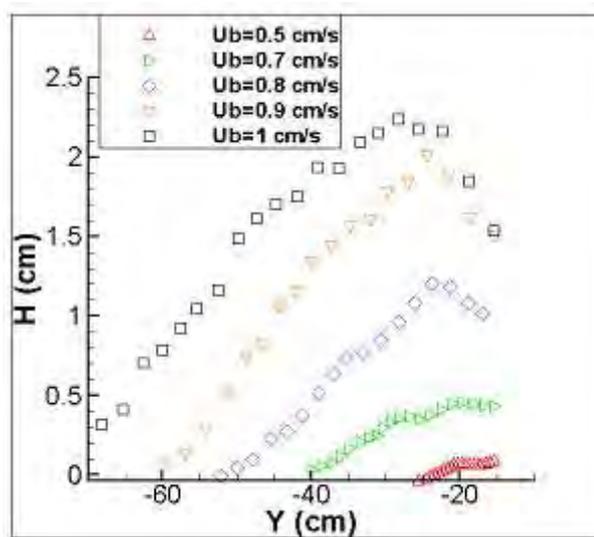


Figure 59 : Suivi du niveau de la crête d'une vague

Grâce à un repérage des crêtes et des creux, il est possible de déterminer l'angle  $\beta$  des vagues divergentes, défini sur la représentation de Baw (2005). On note alors que l'angle  $\beta$  diminue avec le nombre de Froude, donc dans notre cas avec la vitesse du bateau ( $U$ ). Il est plus difficile de repérer l'angle  $\theta$  correspondant à l'interface entre les vagues transversales et divergentes.

Cependant dans certains cas, la représentation du champ de vagues en couleurs nous permet de le déterminer graphiquement. On trouve alors des valeurs proches de la valeur théorique  $19,47^\circ$  et ceci indépendamment des paramètres. Cette valeur respecte donc bien la théorie.

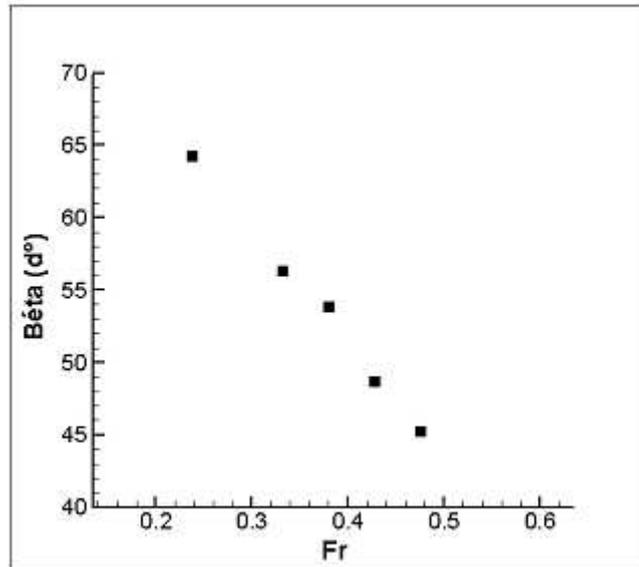


Figure 60 : Evolution de l'angle  $\beta$  en fonction du nombre de Froude pour un tirant d'eau de 9,3 cm

Dans le cadre de l'étude de l'impact des ondes de batillage sur les berges, il est important d'analyser les caractéristiques des vagues sur les parois du bassin. Les données issues de la sonde la plus proche de la paroi font donc l'objet d'un traitement plus approfondi. De plus, l'étude bibliographique a introduit des grandeurs liées au taux d'érosion des berges. Par exemple, Pham Vam Bang mesure les hauteurs et les fréquences des ondes de batillage pour les mettre en relation avec l'érosion des rives. Ici, pour chaque vitesse, les hauteurs maximales des vagues au contact de la paroi ainsi que les hauteurs moyennes sont déterminées. Les résultats montrent une augmentation de ces deux grandeurs avec l'accroissement de la vitesse du navire (0).

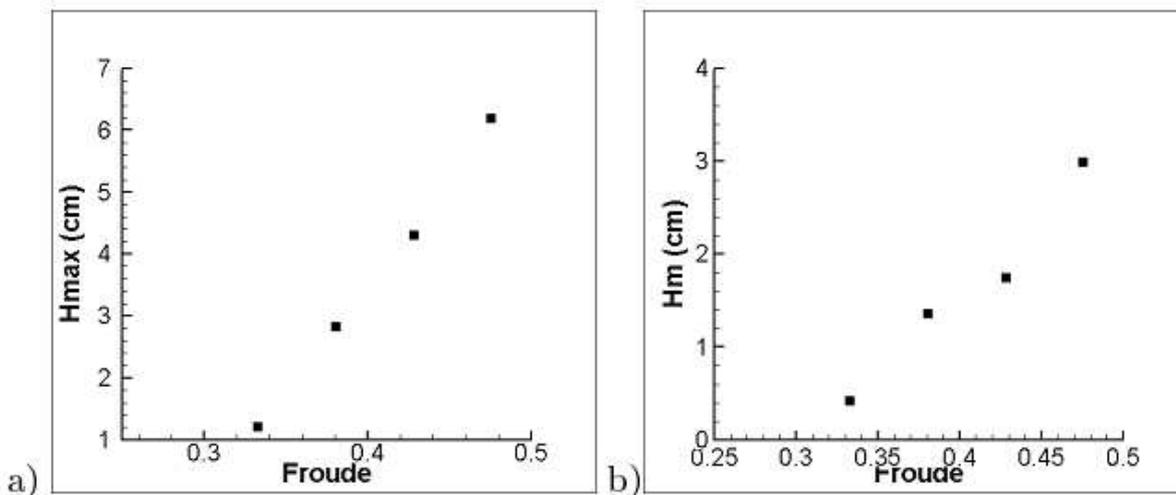


Figure 61 : a) Hauteur maximale ( $H_{max}$ ) sur le bord en fonction du nombre de Froude ; b) Hauteur moyenne ( $H_m$ ) sur le bord en fonction du nombre de Froude

En appliquant une analyse de Fourier, par l'intermédiaire de FFT, il est possible d'obtenir une fréquence caractéristique des ondes près de la paroi. De manière générale, les observations montrent une diminution de la fréquence des ondes de batillage quand la vitesse du bateau augmente (0). Cependant, les valeurs de fréquence entre un nombre de Froude de 0,38 et 0,43 sont les mêmes.

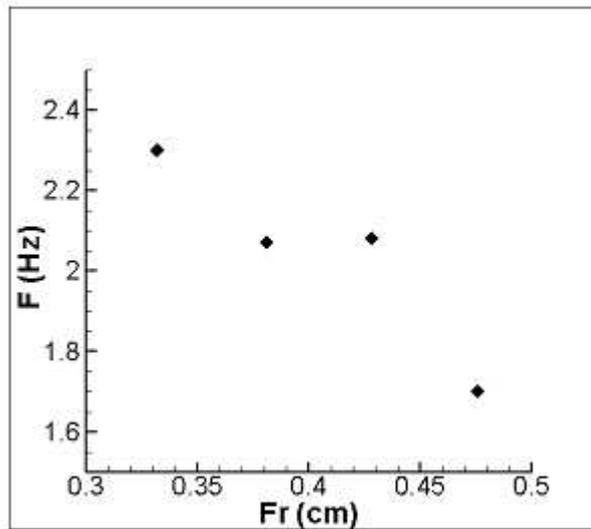


Figure 62 : Evolution de la fréquence des vagues impactant le bord en fonction du nombre de Froude

### 3.5.4.3 Influence du tirant d'eau

Afin d'analyser l'influence du tirant d'eau, seules les mesures de hauteurs de vagues sont analysées. Les champs de vagues autour du bateau sont présentés pour les trois tirants d'eau étudiés : 6,5 centimètres, 9,3 centimètres et 10,7 centimètres (0). L'allure générale de ces champs de vagues est la même indépendamment du tirant d'eau. Seule l'amplitude des vagues diffère en augmentant avec l'accroissement du tirant d'eau. Ceci peut s'expliquer par un volume d'eau déplacé plus important avec l'enfoncement du navire. Les lignes d'interférences sont également plus marquées. Le suivi du niveau de crête d'une vague pour les trois valeurs du tirant d'eau illustre ce phénomène (0). La hauteur maximale de la ligne d'interférence augmente avec le tirant d'eau.

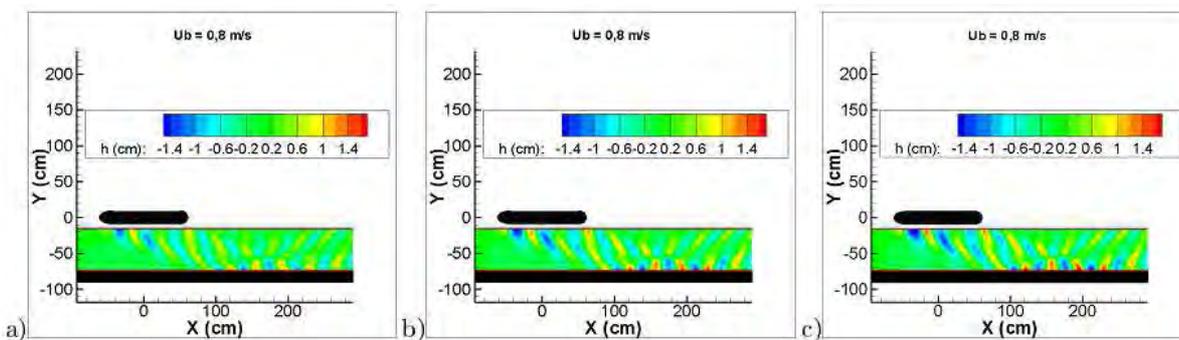


Figure 63 : Champs de vagues pour différents tirants d'eau D : a) D=6,5 cm; b) D=9,3 cm; c) D=10,7 cm

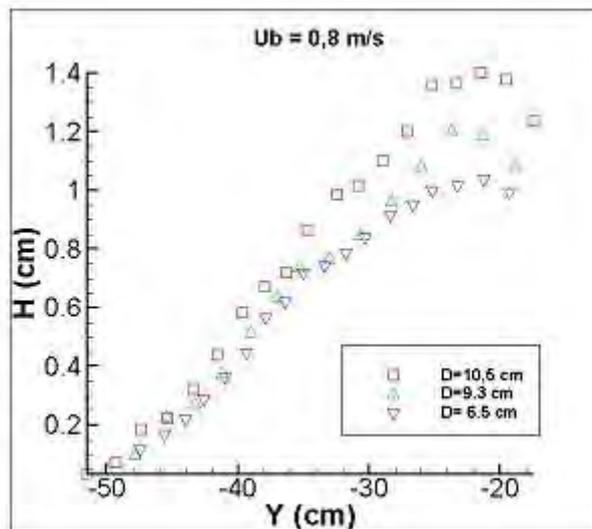


Figure 64 : Suivi du niveau de crête d'une vague pour les trois tirants d'eau

En ce qui concerne la position du point de réflexion, sa valeur est la même pour les trois tirants d'eau. Ceci peut être visualisé par la représentation des crêtes des vagues pour les différentes valeurs de tirant d'eau (0). Les lignes de crêtes se superposent. L'angle des vagues divergentes,  $\beta$ , est donc le même dans les trois cas et vaut environ  $55^\circ$ .

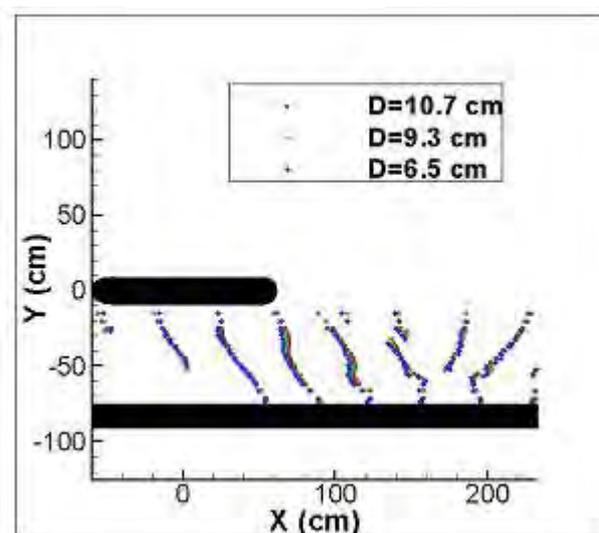


Figure 65 : Ligne de crête pour les trois tirant d'eau

Les hauteurs moyennes et maximales des vagues venant impacter la paroi sont déterminées pour les trois tirants d'eau et représentées en fonction du volume d'eau déplacé (0). Ici, on observe une évolution importante entre les deux premières valeurs sur les deux graphiques. Ceci peut s'expliquer par un écart plus important du volume d'eau déplacé entre les deux premiers tirants d'eau. Les hauteurs moyennes et maximales pour des tirants d'eau de 9,3 centimètres et 10,7 centimètres sont proches. Les courbes semblent montrer que l'augmentation du tirant d'eau entraîne un accroissement des hauteurs de vagues impactant la paroi jusqu'à une certaine valeur. Cependant pour confirmer cette tendance, le nombre de tirants d'eau analysés devrait être augmenté.

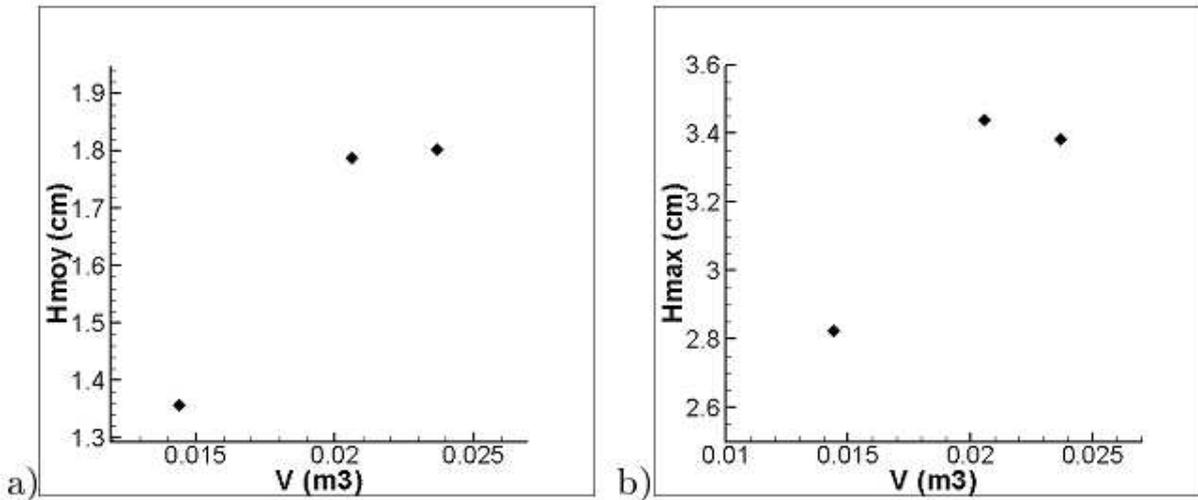


Figure 66 : Hauteur moyenne (a) et maximale (b) des vagues venant impacter la paroi en fonction du volume d'eau déplacé par le navire

### 3.5.4.4 Conclusion

L'influence des deux paramètres étudiés lors de ce travail a donc été analysée. L'impact de la vitesse a été décrit à partir de deux cas de mesures. L'allure générale de l'écoulement est semblable dans les deux exemples. Cependant, les vitesses présentes dans l'écoulement sont différentes suivant les cas. Elles augmentent avec l'accroissement de la vitesse du navire. L'étude des vitesses moyennes dans la colonne d'eau a permis de quantifier ce phénomène. Les caractéristiques du champ de vagues sont également affectées par l'évolution de la vitesse du bateau. Les variations des propriétés des ondes de batillages (hauteurs de vagues, angles...) en fonction du nombre de Froude ont été détaillées. De même, l'effet du tirant d'eau sur le champ de vagues a été exposé. L'augmentation de ces deux paramètres génère des hauteurs de vagues plus importantes.

#### **4. Retombées Opérationnelles directes et/ou indirectes du projet**

Les travaux réalisés dans le cadre du projet IBIS sont notamment fondés sur des suivis en continu moyen terme (3 mois minimum) d'un certain nombre de paramètres. Ils permettent dans le cadre des aménagements du chenal de la Seine (approfondissement et restauration des berges) de **répondre à la question de la réalité du batillage, de bien caractériser ce phénomène, de proposer une méthode de mesure et d'analyse du phénomène et de proposer des descripteurs du phénomène**. Ces éléments peuvent être utilisés par tout maître d'ouvrage souhaitant aménager les berges et quantifier et qualifier l'effet du batillage. Aucune méthodologie n'existait jusqu'à maintenant.

**La réalité du batillage** en Seine faisait débat au cours notamment des réunions d'information ou des enquêtes publiques. Aucune donnée n'existait dans la littérature par rapport à des mesures de terrain. Ce travail est donc le premier dans le genre, fondé sur le passage de 2000 navires en estuaire de Seine et la surveillance des ondes qu'ils génèrent, ceci pendant une période de 3 mois. La caractérisation des navires, par des critères reconnus dans la littérature, et la mesure des ondes de batillages produites ont fait l'objet d'une étude statistique complète qui permettra aux usagers de ces espaces (public, association, collectivité, GPMR) de débattre sur le sujet en toute connaissance de cause.

Le suivi sur une année du phénomène de batillage a permis de **mettre en oeuvre des outils de mesures et de développer des interprétations** qui pourront être utilisées dans le futur par différents opérateurs travaillant sur le sujet. Ce travail a été réalisé en coopération avec le GPMR qui a implanté un système équivalent plus à l'aval. Cette méthodologie est applicable à tout espace du même type, notamment des espaces complexes comme les estuaires macrotidaux dont le plan d'eau se modifie rapidement au cours du cycle de marée.

**L'effet du déferlement de ces ondes sur les sédiments de la berge** elle-même et notamment les berges type plage, a été démontré. Les descripteurs permettent de bien distinguer l'effet lié aux courants de marée très forts dans ces milieux macrotidaux et l'effet de ces ondes. L'étude a amené quelques éléments de réponse par rapport au type de sédiment (vases, sables) et par rapport à la morphologie de la zone étudiée.

**En terme prospectif**, l'étude en canal a permis de formaliser le phénomène, surtout bien décrit en eau libre mais pratiquement pas sur les berges. Cela doit amener à terme une modélisation complète du mécanisme. De nouvelles avancées, non prévues initialement, ont été réalisées sur la compréhension du phénomène de déstructuration du sédiment par des études préliminaires sur l'écoulement interstitiel dans le sédiment soumis à ces phénomènes.

## **Conclusion & Perspectives**

Le projet IBIS a pour but d'évaluer l'impact du batillage sur les berges en Seine. Dans ce cadre, des mesures sont effectuées sur les rives de la Seine afin d'estimer les conséquences du passage des bateaux sur l'érosion des berges. Les mesures de terrain ont permis d'obtenir un set de données unique à l'échelle internationale, car les navires qui naviguent sur l'estuaire possèdent des gabarits variés. De plus, le nombre de passage de bateaux enregistré est conséquent (plusieurs milliers) et permet de proposer une approche statistique de l'effet du batillage sur les berges. Les résultats montrent que l'impact du batillage est une combinaison complexe entre les paramètres du navire (longueur, largeur, clair sous quille, distance à la berge...) et des paramètres environnementaux (hauteur d'eau, largeur du chenal, granulométrie de la zone intertidale...). Les ondes générées par les navires peuvent se distinguer en 3 catégories : Navires maritimes, navires fluviaux et navires fluvio-maritimes de faible gabarit et les navires fluvio-maritimes de grand gabarit. Les analyses statistiques ont montrées que les vagues qui sont susceptibles de mettre en mouvement le sédiment sont de deux types. Nous avons associé ces deux types de vagues aux catégories de bateau. Les vagues les plus importantes (Type A) générées préférentiellement par les navires maritimes ont un impact limité dans les conditions suivantes : des bateaux descendants autour de la marée basse et à faible vitesse. Les vagues de type B (ayant un potentiel de remobilisation moindre) sont essentiellement liées aux caractéristiques des navires (longueur, largeur, tirant d'eau) et sont peu dépendantes des conditions environnementales.

Les transports sédimentaires sur la zone de Bardouville sont impactés par les vagues de batillage : avec des érosions pouvant être pluri-centimétrique. Le suivi effectué en bas d'estran sur une année, a permis de hiérarchiser les mécanismes responsables des transports sédimentaires sur cette zone : les événements de haute fréquence sont liés au batillage (seconde/minute), les événements de moyenne fréquence (jour/mois) sont contrôlés par les cycles de marée et les événements de basse fréquence (annuels) sont liés au cycle hydrologique. Les études spatiales sur le site de Bardouville montrent que malgré le dynamisme de cette zone à des pas de temps courts, à l'échelle annuelle, le bilan sédimentaire montre une relative stabilité. Au final, le sédiment de cette zone n'est pas exporté vers le chenal.

Les résultats acquis sur la zone envasée de Petiville montre que malgré la fréquence des événements de batillage, leur impact sur le transport sédimentaire est relativement limité comparativement à l'impact des cycles de marée et du cycle annuel. Cette tendance est liée aux caractéristiques de cette zone de l'estuaire, où le chenal est plus profond et plus large, et au fait que les navires naviguent préférentiellement soit à basse mer (lorsque le site est émergé), soit à marée haute.

En complément des mesures réalisées sur le terrain, une étude en laboratoire a été menée. Pour cela, des méthodes de mesure adaptées à l'écoulement généré par un navire ont été mises en place dans le bassin des carènes de l'Institut PPRIME. La comparaison des résultats obtenus avec des données de terrain a été entamée dans le but de valider cette étude. La lecture de la bibliographie a mis en évidence que les caractéristiques des vagues générées par un bateau dépendent d'un grand nombre de facteurs. Au cours de cette étude, l'influence de la vitesse du navire et celle du tirant d'eau ont été analysés. Les valeurs de ces paramètres ont été déterminées en s'appuyant sur des données du Port Autonome de Rouen fournissant les propriétés des bateaux naviguant sur la Seine. Une similitude de Froude a ainsi permis de définir une gamme de vitesse. En ce qui concerne le pied de pilote, trois valeurs ont été étudiées. L'utilisation de techniques performantes a permis « reconstruire » le volume comprenant l'ensemble des valeurs de vitesse liées au passage d'un bateau. De plus, un travail de traitement d'image a été réalisé dans le but de minimiser les erreurs sur le calcul des champs de vitesse. Pour cela des algorithmes de détection de la surface libre ont été développés. L'intérêt de ce travail a été présenté à partir de la

comparaison des résultats issus d'images traitées et non traitées. Des perspectives ont été proposées afin de quantifier cet intérêt. Enfin, cette méthode a été validée à l'aide des mesures réalisées à partir des sondes résistives.

Les propriétés de l'écoulement ont été décrites en détail pour une vitesse de navire de 0,8 m/s et un tirant d'eau de 9,3 centimètres. L'évolution des hauteurs et des champs de vitesse autour de la maquette a été exposée. Au regard des fluctuations du niveau d'eau et des vitesses acquises sur la Seine au passage d'un bateau, l'écoulement « modélisé » en laboratoire reproduit les mêmes phénomènes. Un courant de retour suivi d'une succession d'ondes de batillage est observé. En ce qui concerne la succession de vagues, elle semble convenablement représentée. Cependant, les phénomènes liés au courant de retour sont moins marqués dans le cas du modèle. Ceci s'explique par la différence de configuration entre les deux écoulements. En effet, lors de cette étude, le rapport de la section immergée du bateau sur la section mouillée du canal est beaucoup plus important que dans la réalité. Une des perspectives de ce travail est de réduire la section du canal afin de modéliser au mieux les phénomènes hydrauliques liés au passage d'un bateau sur la Seine.

L'influence de la vitesse du navire et l'effet du tirant d'eau sur les caractéristiques de l'écoulement ont été détaillés. L'augmentation de la vitesse comme du tirant d'eau entraîne des amplitudes de vagues plus importantes. Pour la vitesse du bateau, tous les cas de mesures n'ont pas été analysés.

Seuls les résultats pour un tirant d'eau de 9,3 centimètres et pour des vitesses de 0,7 m/s et 0,8 m/s ont été traités. Afin de quantifier l'influence de ce paramètre, les valeurs de vitesse moyenne dans la colonne d'eau ont été comparées. La détermination de grandeurs caractéristiques reliant les propriétés de l'écoulement à l'érosion pourrait être envisagée lors de prochaines études. Par exemple, il serait peut être intéressant de rechercher des critères se rapportant aux variations de vitesse par rapport au temps (Figure ci dessous). On note également que les images PIV des acquisitions effectuées pour des valeurs supérieures à 0,8 m/s comportaient trop de zones de réflexions pour pouvoir être analysées. Dans l'objectif de réaliser de nouveaux travaux à ce sujet, des solutions à cette difficulté technique devront être trouvées.

A long terme, la finalité d'un tel travail est de comprendre au mieux les relations entre le batillage et le taux d'érosion dans le but de prétendre à la protection des berges. Pour cela, l'influence d'un grand nombre de facteurs liés au bateau et à l'environnement doit être pris en compte afin de prédire les caractéristiques des ondes de batillage. Par exemple, des limitations de vitesse en fonction des propriétés des navires naviguant sur la Seine pourraient permettre de préserver les rives.

## **Bibliographie**

BAW, (2005). Bulletin n°88 of the federal Waterways Engineering and research institute: Principles for the Design of Bank and Bottom Protection for inland Waterways. Bundesanstalt für Wasserbau; Karlsruhe Publications, Germany.

BHOWMIK N.G. & al., (1991) « Waves generated by recreational traffic on the upper Mississippi river system ». Research report 117, State of Illinois, Department of energy and natural resources. 63p.

BOUCHARD J-P., (1983) “ Effets érosifs des jets d’hélice de bateau sur les fonds et les talus des voies navigables ». Houille blanche ISSN 0018-6368, Vol. 38. n°7-8. 485-493.

DAUPHIN D., (2000) « Influence de la navigation commerciale et de la navigation de plaisance sur l’érosion des rives du Saint-Laurent dans le tronçon Cornwall-Montmagny ». Ministère des transports, Québec. 221p.

DORAVA J.M., MOORE G.W., (1997) “Effects of boatwakes on streambank erosion, Kenai River, Alaska”. USGS Water-Resources Investigations Report, 84p.

FOUSSARD, V., (2009) “Usages et aménités: Aménagement de l’estuaire de la Seine », Fiche thématiques du GIP-Seine-Aval, 6p.

HUGHES Z.J. & al., (2007) “The impact of natural waves and ferry wakes on Bluff Erosion and Beach Morphology in Boston Harbor, USA”. Journal of Coastal Research, Special Issue 50. 497-501.

HOFMANN H. & al., (2008) “The relative importance of wind and ship waves in the littoral zone of a large lake”. University of Konstanz, 13p.

KIM, J. & al., (2000) “Estimating bottom shear in a tidal boundary layer from acoustic doppler velocimeter data”. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 126. n°6. 399-406

LEMOINE, M. (2010) “Carctérisation hydro-sédimentaire de la zone de Bardouville (Normandie, France). Mémoire de Master de l’Université de Rouen, 50p.

MACFARLANE G.J., RENILSON M.R., (1999) « Wave wake – A rational method for assessment ». Australian Maritime College, Launceston, Australia. 15p.

MOLLAND A.F. & al., (2002) “Theoretical prediction of the characteristics of ship generated near-field wash waves”. University of Southampton, Ship Science Report, n°125. 33p.

NANSON G.C. & al., (1994) “Experimental measurements of river-bank erosion caused by boat-generated waves on the Gordon River, Tasmania”. Regulated Rivers: Research & Management, Vol. 9. n°1. 1-14.

RAPAGLIA, J. & al (2011) "Characteristics of ships' depression waves and associated sediment resuspension in the Venice Lagoon, Italy" *Journal of Marine Systems*, Vol. 85. n°1-2. 45-56.

SANFORD L.P., (1994) "Wave-forced resuspension of upper Chesapeake Bay muds". *Estuaries*, Vol.17. n° 1. 148-165.

SCHOELLHAMER, D.H., (1996) "Anthropogenic sediment resuspension mechanisms in a shallow microtidal estuary". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 43. 533-548.

SOOMERE T., (2005) « Fast ferry traffic as a qualitatively new forcing factor of environmental processes in non-tidal sea areas: A case study in Tallinn Bay, Baltic sea ». *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 5. n° 4. 293-323.

SOULSBY, R.L., (1997) "Dynamics of Marine sands. A manual for practical Applications", Thomas Telford, London, 249p.

SOULSBY, R.L., (1995) "Bed shear stress due to combined waves and currents." In: Stive et al., (Eds), *Advances in coastal morphodynamics*, Delft Hydraulics, pp. 4:20-4:23.

SOULSBY, R.L and HUMPHERY, J.D., (1990) "Field observations of wave-current interaction at the bed sea". In Torum, A., Gudmestad, O.T. (eds), *Water wave Kinematics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 413-428.

VARYANI K.S., (2006) "Full scale study of the wash of high speed craft". *Ocean Engineering*, Vol. 33. 705-722.

VELEGRAKIS A.F. & al., (2006) "Field observations of waves generated by passing ships: A note". *Coastal Engineering* 54, 369-375.

VERNEY R. & al., (2007) "The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudflats: Impact of boat traffic and wind". *Continental Shelf Research* 27, 597-612.

VOULGARIS, G., MEYERS, S.T., (2004) « Temporal variability of hydrodynamics sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek" *Continental Shelf Research*. Vol. 24. n°15. 272-289.

WIBERG, P.L., SHERWOOD, C.R., (2008) "Calculating wave-current bottom velocities from surface-wave parameters". *Computers & Geosciences*. Vol. 34. n°10 . 1243-1262.

# Annexe: Communication à « 34rd IAHR Biennial Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment », Bisbanne, Australie : congrès international avec actes et comité de lecture

## Study of unsteady flow generated by boat motion, quantification of the impacts on riverbank erosion.

G. Gomit<sup>1</sup>, D. Callaud<sup>1</sup>, L. David<sup>1</sup>, R. Lafite<sup>2</sup>, J. Deloffre<sup>2</sup>, O. Blanpain<sup>2</sup>, A. Ezersky<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institut Pprime

Cnrs, Université de Poitiers, Ensm  
Département Fluides, Thermique, Combustion  
SP2MI, Téléport 2, Boulevard Marie et Pierre Curie, BP 30179  
86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex  
FRANCE

<sup>2</sup>Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière  
Université de Rouen, UMR CNRS 6143 M2C  
76821 Mont-Saint-Aignan Cedex  
FRANCE

<sup>3</sup>Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière  
Université de Caen, UMR CNRS 6143 M2C  
14000 Caen Cedex  
FRANCE

E-mail: guillaume.gomit@univ-poitiers.fr

**Abstract:** Laboratory experiments are performed to determine the impact of navigation (sediment re-suspension and riverbank erosion) on the navigation channel maintenance. To assess the effect of boat speed and draught on wave behaviours, an experimental study is performed. Results from towing tank experiments regarding field wave elevation and free surface flow of the Series 80,  $c_B=0.80$  model for Froude numbers based on the water height between 0.23 and 0.48 are presented. Instantaneous measurements of the wave height, by resistive probes device, and of three components of flow velocity in a plane, by Stereoscopic Particle Image Velocimetry technique, are achieved. The spatial and temporal variations of velocity field and wave elevation field are detailed. We point out that these fields may have significant influence on riverbank and ecology.

**Keywords:** Ship waves, laboratory experiments, stereoscopic particle image velocimetry

### 1. INTRODUCTION

The various hydrodynamic phenomena related to the passage of a vessel are described in BAW (2005) and several works have already been undertaken with the purpose to measure the wave behaviours in towing tank. Whittaker *et al.* (2001) measured the wave generated by a fast ferry in shallow water by resistive probes device. Toda *et al.* (1992) and Olivieri *et al.* (2001) have also performed wave height measurements around a ship model. Furthermore, these authors performed measurement of velocities near the hull generated by the ship displacement. Particularly, bank erosion is a phenomenon present in all rivers and waves generated by navigating ships cause an increased erosion rate. Several field experiments were performed to measure the impact of navigation (sediment re-suspension and bank erosion) on the Seine's banks. Particularly, Verney *et al.* (2007), Pham Van Bang *et al.* (2007) and Blanpain *et al.* (2010) have instrumented the bottom and the bank of the Seine river to measure current velocities, the water height fluctuations or suspended particulate matter concentrations. According to Verney *et al.* (2007), the fluvial part of the Seine estuary is affected by boat traffic. The ship passages are revealed by sediment resuspension and increased bottom shear stresses.

This paper reports the results of the laboratory model experiments regarding the field of wave elevation and free surface flow near banks according to Seine boat traffic. Instantaneous measurements of the wave height, by resistive probes device, and of the three components of flow velocity in a plane, by Stereoscopic Particle Image Velocimetry technique, are presented. The effects of the draught and of the ship speed on the wave patterns and on the flow characteristic are analysed.

## 2. EXPERIMENTAL SETUP

### 2.1. Towing tank and programme of experiments

The experiments on waves generated by ship were performed in a towing tank 25 meters long, 1.5 meters wide and 1.2 meters deep. This tank is equipped with a drive carriage which tows a ship model with a maximum speed of 2.5 m / s. The windows placed on the sides and on the bottom of the tank allow us to use an optical measurement system such as cameras or lasers. The waves have been generated by a 1.23 meters long and 18 centimeters wide ship model "Serie 60" with a blocking rate equal to 0.8, for water depth equal to 0.45 m. A Cartesian coordinate system is used. The origin corresponds to the center of the model ship. The x, y, z axes are directed, respectively, in the opposite direction of ship motion, transversely and upward, as shown in Figure 1.

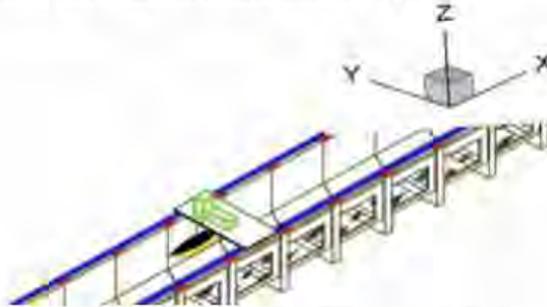


Figure 1 Coordinate system and towing tank scheme

During this study, the effects of boat speed and draught on field of elevation and free surface flow have been analysed. Five speeds of vessel corresponding to a range of Froude number between 0.28 and 0.48 have been tested. We determined the Froude number as  $Fr=U/(gH)^{1/2}$ , where U is for velocity of model, H is for depth of water, g is acceleration of gravity. The influence of the draught has been studied for three values. The first value (6.3 centimeters) relates to an empty ship and the two other values (9.3 centimeters and 10.7 centimeters) relate to a loaded ship.

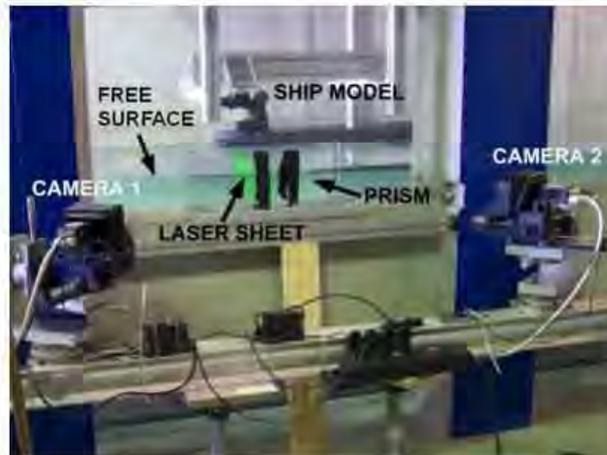
### 2.2. Waves elevation measurement

Free surface fluctuations were measured with a device of resistive probes of Wallingford Company. The sampling rate was 256 Hz. The reproducibility of the measurements was validated by successive tests. From these successive measurements of wave heights, the resolution of the probe has been estimated. The resolution of the measured wave height is 0.1 cm. The wave height measurements were performed on twenty-four points of acquisitions to determine the wave fields with precision between the ship and the wall.

### 2.3. Flow velocity measurement

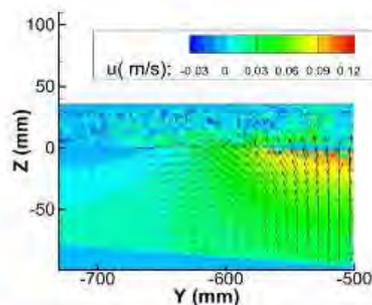
To determine the local velocity fields generated by the ship motion, a stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) measurement system was used. It consists of two CCD cameras JAI (1200\*1600 pixels) for the image recording, a laser Nd : Yag and a computer for data acquisition and synchronization driven by the Dantec software. The images of flow have been recorded across a side window of the towing tank. The CCD cameras were disposed in an angular imaging configuration with Scheimpflug correction. The laser plane is located the closest to the walls and perpendicularly to it. Moreover, a prism filled with water was placed in contact with the side window to limit the optics

aberrations caused by the interface between water and air. The different parts of the experimental device are shown in Figure 2. PIV processing has been performed with a Lavision software. The correlations has been performed with one pass using 64 x 64 pixels interrogation windows followed by three passes using 16 x 16 pixels interrogation windows to centre the correlation peak.

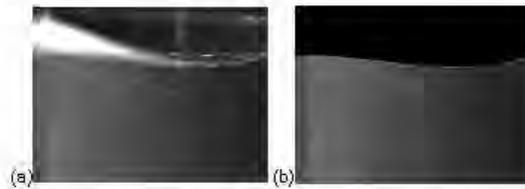


**Figure 2** Experimental device for SPIV measurements

An example of one velocity field is shown in Figure 3. It represents the contours of  $u$  and  $(v,w)$  crossplane vector components in the measurement plane. The upper part of the measurement plane matches to a zone above the free surface, in air. However, due to spurious signal in the recorded image, velocity vectors calculated in this zone by the SPIV algorithm introduce errors during multi passes PIV processing. To resolve this problem and improve the quality of the SPIV results, the images of flow are pre-processed to detect the free surface. On the SPIV images, the free surface is marked in recorded images by high grayscale level as seen on the Figure 4 (a). To detect this edge, an algorithm based on grayscale threshold is applied on the images for each image columns. Binarized images obtained are then treated to localize the free surface. A grayscale intensity equal to zero is finally assigned to all the pixels located above the free surface as shown in Figure 4 (b).

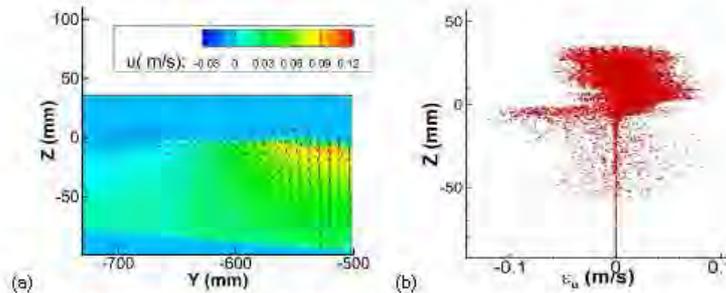


**Figure 3** Examples of velocity field:  $u$  contours and  $(v,w)$  vectors



**Figure 4 Image SPIV recorded: (a) before pre-processing, (b) after pre-processing**

The goal of the image processing is to eliminate the spurious vectors calculated in the zone above the free surface, as shown on the velocity field of the Figure 5 (a). In the case without image processing, the spurious velocities near free surface cause variations on the vectors located in the flow. To evaluate the errors due to spurious vectors estimation, the difference between the  $x$  components of velocity obtained, using processed images and original images, is calculated. The representation of this difference as a function of the depth emphasizes errors on the velocity estimation up to 5 centimeters below the interface, as seen in Figure 5 (b).



**Figure 5 (a) Examples of velocity field calculate with processed images:  $u$  contours and  $(v,w)$  vectors (b) Difference of  $u$  velocity as a function of the depth.  $\epsilon_u$  is the difference between the  $u$  components of velocity obtained using processed images and original images.**

### 3. RESULTS

#### 3.1. Wave elevation

From the wave height measurement performed by the resistive probes, the wave fields around the ship are reconstructed, as shown in Figure 6. The wave pattern consists of both transverse and diverging wave systems. The diverging and transverse waves interact forming interference lines at the stern and at the bow. This line is revealed by higher wave crests as can be seen in Figure 6 (a) at the ship stern. The wave field representation also reveals a point of wave reflection on the tank wall, Figure 6 (b). This point corresponds to the position of the highest wave elevation amplitude measured close to the wall.

The effect of ship speed on the wave behaviours can be seen by comparing Figure 6.a and Figure 6.b which correspond respectively at  $Fr=0.38$  and  $Fr=0.43$  for a draught equal to 9.3 cm. The result emphasizes a significant influence of the vessel speed on the wave patterns. The wave amplitude increases with the Froude number. For a Froude number of 0.43, the maximum of the measured wave amplitude is equal to 4.4 centimeters. For  $Fr=0.38$ , this value is equal to 3.4 centimeters. The representation of the maximum wave height on wall as function of the Froude number confirms the increase of the wave amplitude with this parameter, as shown in Figure 7. Moreover, the position of the reflection point depends on the Froude number. The reflection occurs more near of the ship at  $Fr=$

0.43 than at  $Fr=0.38$ . This evolution has been observed for the other values of the Froude number.

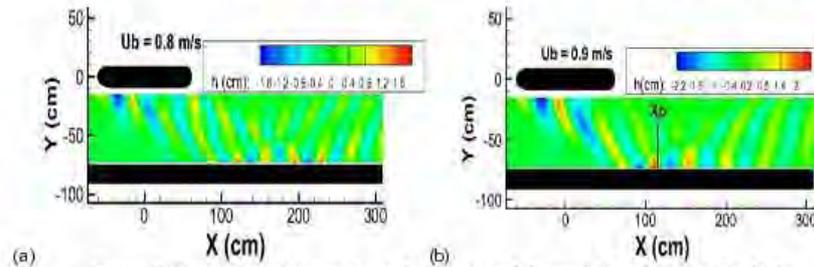


Figure 6 Wave-elevation contours for draught=9.3 cm: (a)  $Fr=0.38$ , (b)  $Fr=0.43$

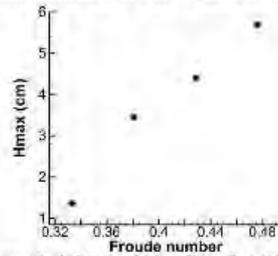


Figure 7 Maximum wave height on the wall as function of the Froude number

Regarding the draught, the maximal wave height increases with this parameter, as shown in Figure 8 (a). For a draught equal to 9,3 centimetres, the wave amplitude is higher than for a draught equal to 6,5 centimeters due to the larger volume water displaced. However, for the two highest draughts, the maximum heights of wave are close. Consequently, to determine the evolution of wave height as a function of this parameter, a larger number of tests should be performed. Moreover, the increasing of draught doesn't change the position of the point of reflection, Figure 8 (b). The positions of the crest are the same regardless of draught.

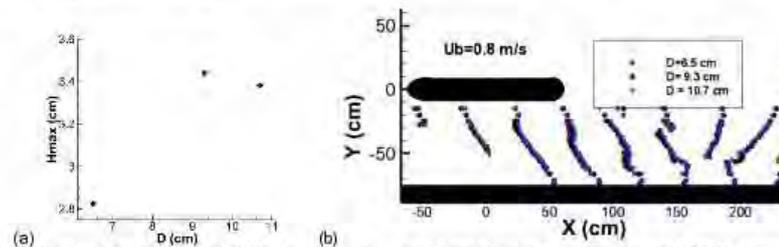
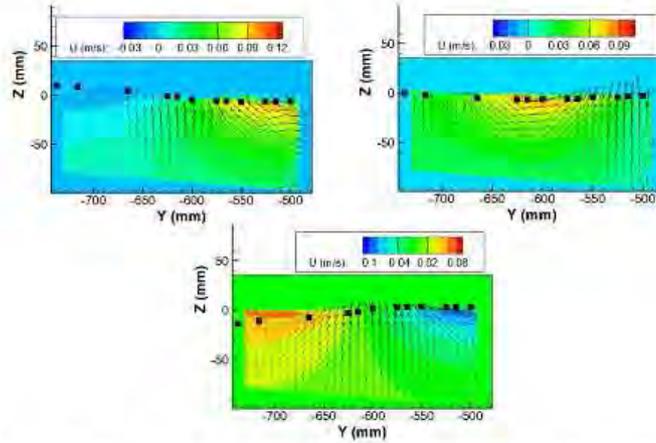


Figure 8 Effect of the draught: (a) Maximum wave height on the wall as function of the Draught (b) Wave crest

### 3.2. Velocity field

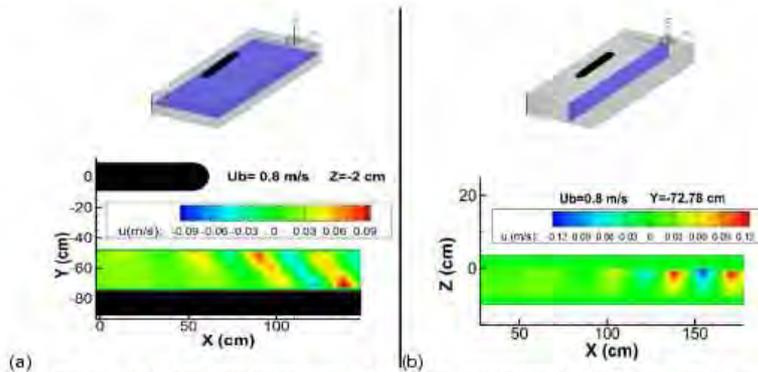
The results obtained by SPIV of the three velocity components allow us to obtain a global view of the flow generated by the ship close to the wall. Figure 9 shows the contours of  $u$  and  $(v,w)$  crossplane vectors in the measurement plane for three successive times. With the aim to validate the algorithm of image pre-processing, the SPIV results are compared with wave elevation measurements obtained using resistive probes. The wave height measurements are represented by black squares on the Figure 9 and reveal a good agreement with the free surface detection on the SPIV images. Away from

the wall, the vector evolution can be compared with the Airy wave model. The fluid particles are in an orbital motion. The passing of one wave corresponds at one changing of the sign of the velocity components. Here, the velocity consists of three components because of the angle between the measure plane and the wave propagation direction.



**Figure 9 Velocity field :  $u$  contours and  $(v,w)$  vectors and wave elevation measurement**

From all the consecutive velocity fields in the measurement plane, we can reconstruct a tridimensional velocity field in the  $(X, Y, Z)$  system coordinate which is defined in the second part. The  $u$  contours in the  $XY$ -plane at  $z=-2\text{cm}$  and in the  $XZ$ -plane at  $y=73\text{cm}$  are shown, respectively, in Figure 10 (a) and Figure 10 (b). In the  $XY$ -plane, away for the wall, the velocity corresponds to the characteristics of the wave airy model: each wave passing induces a changing of the  $u$  sign. Close to the wall, the point of reflection is revealed by an increase of the  $x$  velocity component. The representation of the  $u$  contour, on the Figure 10 (b), highlights the significant velocities values, located in the upper part of the flow. Beyond 5 centimeters under the free surface, the velocity is close to zero.



**Figure 10 (a)  $u$  contour in the Plan  $XY$  (b)  $u$  contour in the plane  $XZ$  close the wall**

To evaluate the effect of the ship speed on the flow behaviours, the mean velocity in the water column is calculated for two vessel speed, 0.7 m/s and 0.8 m/s, as shown in Figure 11. The results reveal significant differences in the values of velocity between the two flows. Nevertheless, the two flows

have similar patterns. The maximum value of the mean velocity in the water column is located close to the wall for the two cases. This point corresponds to the position of the wave reflection. The maximum value of the mean velocity close to the wall is 0.35 m/s for the first vessel speed and 0.95 m/s for the other speed.

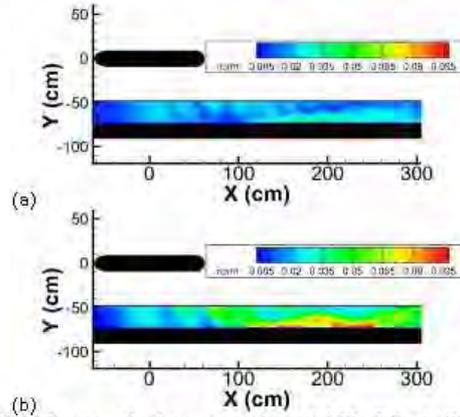


Figure 11 Velocity norm in the water column (a)  $U_b=0.7$  m/s (b)  $U_b=0.8$  m/s

The main result of this work is represented Figure 12 (with cargo illustration). This 3D representation of the coupled measures (velocity norm and wave amplitudes) allows us to define zones of reflections which include the largest velocity values: (i) for  $X=200$  cm, corresponding to the first reflection phenomenon of the wave boat, (ii) for  $X=600$  cm, corresponding to the waves which have been reflected by the opposite bank. The spatial evolutions of norm of velocity and waves emphasises the significant hydrodynamic processes which could control erosion along river banks.

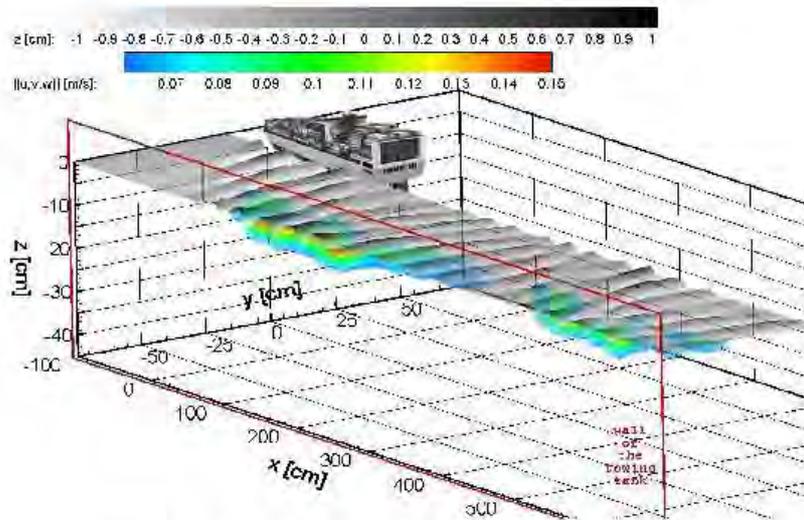


Figure 12 Free surface elevation and iso-surfaces of the velocity norm

#### 4. CONCLUSION

Laboratory experiments have been performed to determine the wave behaviours generated by a ship model "Serie 60,  $C_b=0.8$ " in a towing tank. Instantaneous measurements of the wave height, by resistive probes device have been presented. The measurements of the three components of flow velocity, by a Stereoscopic Particle Image Velocimetry technique, have been achieved and allowed to obtain a reconstruction of the 3D velocity field close to the towing tank wall. A pre-processing on the SPIV images has been required to accurately detect the free surface location and to eliminate spurious vectors near the water-air interface. This algorithm has been validated by comparing the results from the resistive probes and the SPIV results. Development of SPIV images pre-processing algorithm is essential for establishing the feasibility of measuring the three components of flow velocity generated by a ship close to the riverbank.

The effect of boat speed and draught on the wave behaviours have been exposed regarding the field wave elevation. The results emphasize an increase of the wave amplitude with the speed ship and the draught increment. Similarly, the flow velocities significantly increase as function of the boat speed. Spatial evolutions of the three components of the flow velocity highlight regions, near the points of reflections, where the impact of the waves is significant. This may be the first time that the global distributions of three components of flow velocity and of wave amplitudes generated by ship passage were demonstrated. This coupled three components velocity and water waves acquisitions system can easily give us an access of turbulence characteristics (turbulence kinetic energy, shear stresses) close to a laboratory bank.

This work is part of a study which aim is to assess the impact of navigation on the banks of the Seine. This paper presents the first step of this project analysing the hydrodynamic phenomena related to the passage of a vessel in a towing tank. Moreover, this study shows the feasibility of the measurement of field of elevation and tridimensional velocity field close to the wall of a towing tank. The use of artificial bank and comparisons with collected data recorded along the Seine bank could allow us to quantify the key hydrodynamics parameters controlling erosion.

#### 5. ACKNOWLEDGMENTS

This work is part of the project "IBIS: Impact du Batillage: Investigation en Seine", the authors would like to thank the Seine-Aval Regional Scientific Program for financial support.

#### 6. BIBLIOGRAPHIE

BAW (2005). *Bulletin n° 88 of the Federal Waterways Engineering and Research Institute: Principles for the Design of Bank and Bottom Protection for Inland Waterways*. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe publication, Germany.

Blanpain O., Deloffre J., Lafite, R., Gomit G., Callaud D. and David, L. (2010), *Impact of boat-generated waves on intertidal estuarine sediments*, American Geophysics Union Fall Meeting, San Francisco, December 13-17, 2010.

Olivieri A., Pistani F., Avanzini A., Stern F. and Penna R. (2001) *Towing Tank Experiments of Resistance, Sinkage and Trim, Boundary Layer, Wake, and Free Surface Flow Around a Naval Combatant Insean 2340 Model*. IIHR Technical Report No. 421

Pham Van Bang D., Ouahsinea A., Sergent P., Long B., Montreuil S., Debaillon P. and Hissel F. (2007), *Impact du passage des bateaux sur le transport des sédiments et l'entretien des voies navigables: mesures et analyses*. Xèmes journée nationales génies côtiers.

Toda Y., Stern F. and Longo J. (1992). *Mean-Flow Measurements in the Boundary Layer and Wake and Wave Field of a Series 60  $C_B=0.6$  Ship Model-Part 1 : Froude Numbers 0.16 and 0.316*, Journal of ship Research, 36( 4) 360-377

Verney R., Deloffre J., Brun-Cottant J.C. and Lafite R. (2007), *The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudats : Impact of boat traffic and wind*, Continental Shelf Research, 27(5), 594-612

Whittaker T.J.T., Doyle R. and Elsaesser B. (2001) *An Experimental Investigation of the Physical Characteristics of Fast Ferry Wash*. 2nd International EuroConference on High-Performance Marine Vehicles HIPER'01, Hamburg, 2001, pp. 480-491.

Crédit photo couverture : Univ. de Rouen, M2C, O. Blanpain  
Pour tout renseignement, veuillez contacter la coordination scientifique : [cdegremont@seine-aval.fr](mailto:cdegremont@seine-aval.fr)

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Le GIP Seine-Aval est financé par :

