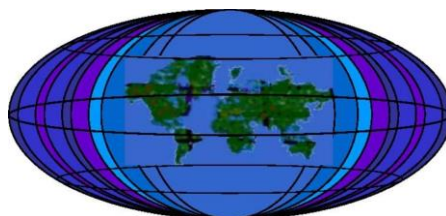


VARIATION TIDALE DE LA STRUCTURATION SEDIMENTAIRE DANS L'ESTUAIRE DE LA CUA LUC RIVER, VIETNAM.



Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications
(CIPMA-Chaire UNESCO)

Master of Science en Océanographie Physique et Applications

Présenté par :

Fifi I. ADODO

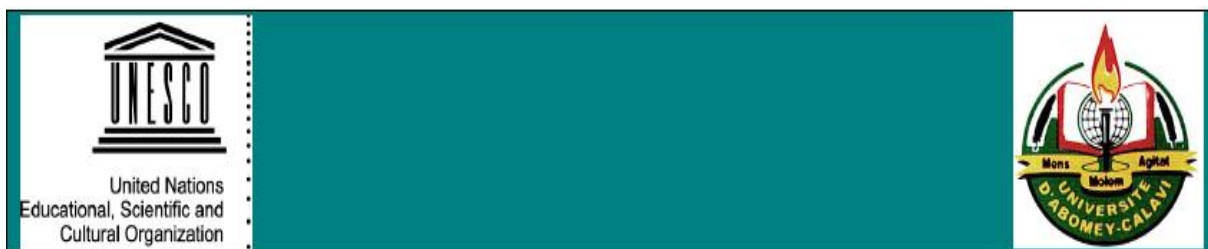
Faculté des Sciences et Techniques (FAST)

Université d'Abomey-Calavi (UAC)

Cotonou, République du Bénin

ICPMA Publishing© 2014





Université d'Abomey-Calavi (UAC), BENIN
Faculté des Sciences et Techniques (FAST)
Chaire Internationale en Physique Mathématique et
Applications
(CIPMA-Chaire UNESCO)

M.Sc N°... /M.Sc/CIPMA/FAST/UAC/2014

**VARIATION TIDALE DE LA STRUCTURATION
SEDIMENTAIRE DANS L'ESTUAIRE DE LA CUA LUC
RIVER, VIETNAM.**

Mémoire de Master of Science
En
Océanographie Physique et Applications

Présenté par

Fifi I. ADODO

Superviseur : **Dr. Jean-Pierre LEFEBVRE**

Jury :

Président :

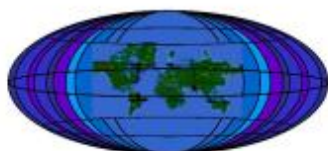
Examineurs :

Rapporteur :

Cotonou, Rép. du Bénin, octobre 2014



SPONSORS



**Chaire Internationale en
Physique Mathématique
et Applications**



**Université Paul Sabatier /
chaires croisées**



**Programme chaires
croisées (Formation et
Recherche en
océanographie Physique
et Applications en
Afrique de l'ouest)**



**Société Total / Total
professeurs associés**

Dédicace

A la mémoire de mes parents.

*« Personne ne s'en va vraiment
tant qu'il y a quelqu'un pour
se souvenir de lui. »*

Remerciements

La réalisation de ce document a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je tiens à remercier mon encadrant Dr Jean-Pierre LEFEBVRE, pour m'avoir confié ce sujet de stage, pour son aide, ses précieux conseils, sa disponibilité et sa rigueur scientifique. C'est un immense plaisir pour moi de travailler sous votre supervision. J'ai appris beaucoup de chose avec vous tant sur le plan informatique et scientifique. Je n'oublie non plus vos mots d'encouragement à la fin de chacun de nos échanges.

J'adresse mes chaleureux remerciements à tous les professeurs qui ont accepté d'accorder de leurs temps pour nous inculquer les bases de l'océanographie physique et assurer la partie théorique de la formation.

Mes remerciements iront au docteur Yves Du PENHOAT pour sa disponibilité et ses conseils, au docteur Gaël ALORY et à Rémy CHUCHLA pour leurs conseils et leurs coups de mains précieux en informatique.

Je tiens à remercier le docteur Ezinvi BALOITCHA, pour ses encouragements, son attention particulière et ses conseils de père avisé.

J'associe à ces remerciements le personnel administratif de la CIPMA, les étudiants de la CIPMA toutes filières confondues et tout particulièrement, le président titulaire de la Chaire CIPMA, le Professeur Norbert HOUKONNOU pour avoir initié et accueilli ce programme de formation.

Je voulais remercier tous mes camarades, Kodjo, Marcel, Arielle, Marcellin, Cosme, Michel, Denis et Eunice avec qui j'ai passé ces 12 mois de formation, j'avoue avoir beaucoup appris de vous.

Je tiens à remercier également Madame Pamela Du PENHOAT, pour ses séances d'exercice sur le savoir vivre, l'acceptation et le respect du prochain et la gestion du calendrier.

J'adresse mes remerciements à toute ma famille et toute personne qui a contribué de quelconques manières à la réussite de cette formation. En particulier à Pépé, Gregory, Tichou, Tassi, Mémé, mes oncles et tantes. Un grand merci à Elom pour sa patience et sa compréhension.

Je tiens à dire merci à mes anciens collègues de MSC spécialement à Tadjou, Safui, Honoré Cyrille et Marie-José pour leurs amitiés et soutiens.

Enfin merci à tous ceux que j'ai oublié de mentionner ici, je vous porte dans mon cœur.

SOMMAIRE

| | |
|--|-----|
| Dédicace | i |
| Remerciements | ii |
| SOMMAIRE | iii |
| Résumé | 1 |
| Abstract | 2 |
| 1 INTRODUCTION | 3 |
| 2 Matériels et Méthode | 5 |
| 2.1 Zone d'étude | 5 |
| 2.2 CTD (Conductivity, Temperature, Depth) | 7 |
| 2.2.1 Elimination des données aberrantes de fond | 7 |
| 2.3 LISST 100 X (Laser In Situ Scattering and Transmissometry)..... | 7 |
| 2.3.1 Distribution de la taille des floes | 8 |
| 2.4 OBS (Optical Back-Scatter) | 9 |
| 2.5 Mesure directe de SSC par prélèvement d'eau (bouteilles Niskin) et filtration..... | 9 |
| 2.5.1 Calibration de la turbidité en SSC..... | 9 |
| 2.6 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) | 10 |
| 2.6.1 Paramètres hydrodynamiques | 11 |
| 2.7 Stratification haline..... | 12 |
| 3 RESULTATS | 13 |
| 3.1 Concentration de sédiments en suspension (SSC)..... | 13 |
| 3.2 Salinité..... | 14 |
| 3.3 Amplitude et direction de l'écoulement | 15 |
| 3.4 Distribution de la taille des floes (Diamètre médian apparent D_v)..... | 17 |
| 3.5 Distribution de la concentration volumique relative (CVR) des floes durant le cycle de la marée..... | 18 |
| 3.6 Turbulence | 20 |
| 3.7 Stratification | 21 |
| 3.8 Turbulence et concentration de sédiments en suspension (SSC) | 21 |
| 3.9 Turbulence et distribution des concentrations volumiques relatives et taille des floes | 22 |
| 4 DISCUSSIONS | 24 |
| 4.1 Turbulence et SSC | 24 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.2 | Paramètres hydrodynamiques et distribution de tailles des floes | 24 |
| 5 | CONCLUSION | 26 |
| 5.1 | Perspectives | 26 |
| | Bibliographie | 27 |
| | Annexes | 29 |
| | Liste des figures | 36 |
| | Listes des tableaux | 37 |

Résumé

Les sédiments en suspension jouent un rôle majeur dans les écosystèmes côtiers, principalement de deux façons : en limitant la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau et en absorbant les polluants chimiques. Pour ces raisons, l'étude des particules minérales de la zone côtière revêt d'une importance capitale. Cette étude contribue à la connaissance du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Cua Luc, Vietnam, qui se jette dans la baie d'Halong. En particulier, les effets des variations saisonnières de la turbulence et de la concentration de sédiments en suspension (SSC) sur la distribution de la taille des floccs ont été étudiés. Des mesures in situ de 24 heures de l'amplitude de l'écoulement, de turbidité et de distribution des classes de tailles des floccs ont été menées dans l'estuaire pendant la saison humide à marée de vive eau et la saison sèche à marée de morte eau. Le traitement et l'affichage des données ont été réalisés avec des routines développées sous matlab. Selon la théorie des fractales de la floculation, les distributions des tailles des agrégats ont été décomposées en quatre modes, les flocculi ($<10\mu\text{m}$), les microflocs fins ($<40\mu\text{m}$) et grossiers ($<100\mu\text{m}$) et les macroflocs ($>100\mu\text{m}$). Pendant la saison humide, les variations de la taille des floccs sont contrôlées par la turbulence et plus par les processus de remise en suspension et de décantation différentielles pendant la saison sèche. Ces résultats montrent une similitude du fonctionnement hydro-sédimentaire avec l'estuaire de Bach-Dang Cam, situé au nord-ouest du golfe de Tonkin (Vietnam), malgré les différentes caractéristiques des deux estuaires.

Mots-clés : sédiments cohésifs, floculation /désagrégation, turbidité, turbulence, estuaire, baie d'Halong, Vietnam.

Abstract

Suspended sediments play a major role in coastal ecosystems, mostly in two ways, by limiting light penetration through the water column and by adsorbing chemical pollutants. For these reasons, the fate of mineral particles in coastal area is of tremendous importance. This study contributes to the knowledge of the hydro-sedimentary functioning of the Cua Luc Estuary, Vietnam, which flows into the Halong Bay. Particularly, the impacts of seasonal variations for turbulence and suspended sediment concentration (SSC) on flocs size distribution is addressed. In situ 24 hours surveys of flow, turbidity and flocs size distribution were conducted in the estuary during wet season at spring tide and dry season at neap tide. Data processing and plotting were achieved by use of Matlab routines. According to the fractal theory for flocculation, four levels of structures were considered in the aggregates size distributions : flocculi ($<10\ \mu\text{m}$), fine ($<40\ \mu\text{m}$) and coarse ($<100\ \mu\text{m}$) microflocs and macroflocs ($\geq 100\ \mu\text{m}$). During the wet season, flocs size variations are governed by turbulence, and during the dry season, more by re-suspension and differential settling processes, along with volume concentration of SSC. These results indicate similarities in hydro-sedimentary seasonality with the Bach-Dang Cam estuary, located westward in the northern Gulf of Tonkin (Vietnam), despite of different features of the two estuaries.

Keywords: cohesive sediments, flocculation/breakup, turbidity, turbulence, estuary, Halong bay, Vietnam.

1 INTRODUCTION

De par son classement par l'UNESCO comme site patrimoine de l'humanité, la préservation de la baie d'Halong revêt une importance cruciale, d'autant que l'impact anthropique lié à l'exploitation touristique de la zone se surajoute à d'autres sources de pollution moderne, telles que l'apport en carbone atmosphérique par les centrales à charbon vietnamiennes et chinoises (Mari et al. 2012).

Connaitre le fonctionnement hydro-sédimentaire de la baie constitue une avancée significative pour la protection et la préservation du site. Le présent travail porte sur la source principale d'apport sédimentaire continental de la baie d'Halong, l'estuaire de la Cua Luc.

Les apports terrigènes continentaux peuvent menacer sévèrement l'équilibre écologique du domaine côtier, et ceci de deux manières: sous forme de matière en suspension, ils limitent par absorption, la quantité de lumière atteignant les systèmes benthique peu profonds, et en se déposant, les sédiments peuvent piéger les éléments polluants et concentrer leur présence dans les zones de pêches (Ho et al. 2013, Lefebvre 2014, Chu et al. 2014).

Le transport sédimentaire est la résultante de deux composantes : l'écoulement horizontal de l'eau, et les mouvements verticaux des sédiments dans la colonne d'eau. Quatre mécanismes concourent au devenir des sédiments dans la colonne d'eau : l'advection et la vitesse de chute dans la colonne d'eau, et l'érosion et dépôt entre le fond et la colonne d'eau. Deux propriétés des agrégats sédimentaires (ou 'flocs') gouvernent leur vitesse de chute : leur taille et densité (Winterwerp 2002).

La taille des flocs résulte d'un équilibre entre deux mécanismes antagonistes d'accroissement (floculation) et de limitation (rupture). L'accroissement de la taille des flocs dépend principalement de deux facteurs : la concentration en sédiment et la turbulence, cette dernière augmentant la fréquence des collisions entre particules et la concentration en sédiments réduisant la distance entre les particules (Dyer & Manning 1999). Les particules microscopiques en suspension dans un fluide sont mues par l'agitation thermique des molécules constituant ce fluide (mouvement Brownien). Enfin, lorsque des flocs de tailles et densités variables coexistent dans la colonne d'eau, des collisions supplémentaires peuvent avoir lieu entre les flocs chutant rapidement et ceux chutant lentement. On appelle ce mécanisme, la décantation différentielle. Parmi les trois principales sources de collision mentionnées précédemment (mouvement brownien, agitation turbulente et décantation différentielle), la turbulence est le mécanisme dominant (Manning 2004, Kumar et al. 2010, Manning & Schoellhamer 2013).

Outre l'agitation qu'elle crée, la turbulence génère une contrainte turbulente de cisaillement, qui limite la taille des flocs à l'ordre de grandeur de la dimension des plus petits tourbillons turbulents avant leur dissipation par la viscosité du fluide. Cette dimension est caractérisée statistiquement par la micro-échelle de Kolmogorov (van Leussen 1997, Jarvis et al. 2005).

De par sa variabilité en termes de forçage (marée) et de charge sédimentaire (bouchon vaseux, apports continentaux et marin), la floculation est un paramètre clef à la compréhension du fonctionnement hydro sédimentaire estuarien. Ces mécanismes sont extrêmement dynamiques, la distribution de taille de flocs s'adaptant quasi instantanément aux changements

des paramètres physiques du site; la turbulence et la concentration des sédiments en suspension varient au cours du cycle de la marée ainsi qu'à l'échelle saisonnière.

Au Vietnam, l'alternance des saisons sèches et saisons humides induisent une variabilité annuelle dans les régimes estuariens avec une contribution fluviale importante durant la saison des pluies. A l'inverse, durant la saison sèche, l'influence de la composante tidale prédomine. Ceci se traduit notamment par une variabilité de la stratification de la colonne d'eau (stratifiée durant la saison sèche et bien mélangée durant la saison des pluies), de l'érosion des fonds et des mécanismes associés (Lefebvre et al. 2012).

L'objectif de ce stage est de décrire le fonctionnement hydro sédimentaire de l'estuaire de la Cua Luc et plus particulièrement les mécanismes responsables de la variation de la concentration et de la taille des floes pendant la saison humide et la saison sèche. Pour ce faire, on fera une analyse des liens entre l'écoulement et la concentration en matière en suspension ensuite de l'influence de ces derniers sur la variation de tailles des particules au cours des saisons.

2 Matériels et Méthode

2.1 Zone d'étude

Le Vietnam est sous l'influence d'un climat subtropical humide. Les précipitations annuelles dans la partie Nord avoisinent 200 cm dont 90% des pluies se produisent pendant la mousson d'été (saison des pluies d'avril à septembre). Les vents sont de secteur Sud pendant la saison humide et de secteur Nord-Est en saison sèche (octobre à mars). Les marées dans le golfe du Tonkin sont principalement diurnes en raison de la résonance des composantes O1 et K1. Au voisinage de l'estuaire de la Bach Dang-Cam, l'amplitude maximale des marées est de 4 m (Lefebvre et al. 2012).

La baie d'Halong est une étendue d'eau d'environ 1500 km² située au nord du Vietnam, dans le Golfe de Tonkin, à proximité de la Chine et à 170 km à l'est de Hanoi (capitale du Vietnam). La profondeur dans la baie d'Halong est généralement inférieure à 10 m.

Dans le cadre de l'étude de l'effet du carbone - suie sur le fonctionnement de l'écosystème marin (projet Black Carbon, UMR 238-ECOSYM), deux campagnes de mesures ont été réalisées dans la baie d'Halong, Vietnam. La première campagne dénommée BC1 s'est déroulée en octobre 2012 en fin de la mousson d'été (saison des pluies) et la seconde, BC2, en mai 2013 en fin de la saison sèche. Elles comprenaient une mesure ponctuelle d'un réseau de seize stations notées H01 à H16 (fig.1) et le suivi de 24 heures de trois stations H02, H13 et H14. Ces deux campagnes ont été complétées par un suivi mensuel durant un an, sur quatre stations du réseau à savoir : H02, H04, H08 et H13 (mesures ponctuelles et portant sur moins de paramètres que durant les campagnes).

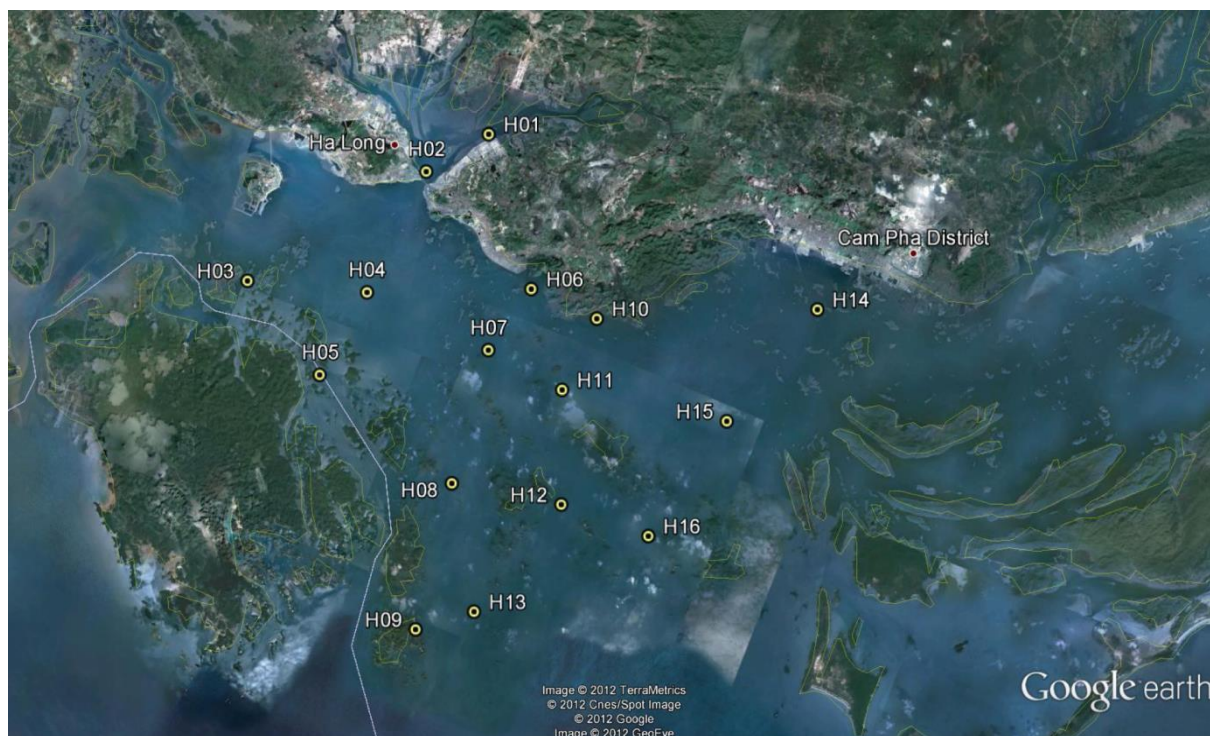


Figure 1. Les différentes stations du projet Black Carbon (UMR 238 ECOSYM).

Cette étude a porté sur l'analyse des données obtenues sur un cycle de marée à la station H02 (fig. 2) située dans l'estuaire de la Cua Luc.

Des mesures simultanées de vitesse de courant (ADCP, Teledyne's RDI Workhorse sentinel 1200 kHz), de turbidité (OBS 3+, Campbell Scientific), de salinité (CTD, Sea-bird SBE19+) et de distribution de classe de taille des agrégats (LISST 100X type C, Sequoia Scientific), ont été réalisées pendant 24 heures dans la baie d'Halong. La campagne BC1 (saison humide) a eu lieu pendant une marée de Vive Eau et BC2 (saison sèche) pendant une marée de Morte Eau. Le cycle a été bouclé pendant BC2 (mesures faites de 12h à 12h du jour suivant) contrairement à BC1 (annexe tab. A).



Figure 2. Station H02 dans la baie d'Halong (20.97°N ,107.06°E)

Les profils CTD et LISST ont été acquis toutes les 2 heures approximativement. Les sondes CTD et LISST ont été solidarisées et armées sur un treuil à main. Outre, l'OBS, la CTD était équipée de différents capteurs supplémentaires (fluorimètre, PAR) non exploités dans cette étude.

Certains profils acquis lors de la saison humide ne couvrent que les premiers mètres sous la surface et non la totalité de la colonne d'eau. Ceci est dû à la coupure du câble auquel étaient fixées les sondes.

Pour chaque profil, l'ensemble LISST-CTD était maintenu en sub-surface environ 1 minute afin que le système de pompe s'amorce, que les bulles d'air s'évacuent du système et que la température se stabilise afin de minimiser son influence sur la réponse des capteurs. Puis il était descendu jusqu'à ce qu'on estime avoir atteint le fond. Afin de tirer le meilleur profit possible de ces appareils en milieux côtier, des routines de traitements ont été développées. Elles permettent de prendre en compte la variation du profil de salinité sur le calcul de la profondeur et d'extraire automatiquement les données correspondantes à la descente des

appareils, de recalculer les profondeurs mesurées par les deux appareils et de sauvegarder les données au format Matlab.

2.2 CTD (Conductivity, Temperature, Depth)

La sonde mesure la conductivité de l'eau ($S.m^{-1}$), sa température ($^{\circ}C$) et la pression à la profondeur de mesure (dbar) à une fréquence fixée lors de ces campagnes à 4Hz (1 mesure toutes les 0.25s). De la conductivité de l'eau de mer a été déduite la salinité équivalente, grandeur sans unité parfois encore notée PSU (Practical Salinity Unit). De la salinité et température, la densité de l'eau ($kg.m^{-3}$) est calculée (Millero et al. 1980, Fofonoff & Millard 1983). La densité de l'eau en chaque point du profil permet de convertir la pression en profondeur sous la surface (m).

Si la variation de température le long de la colonne d'eau n'influe pas sur la mesure, en revanche, lorsque les sondes sont maintenues à l'air entre deux mesures (2 heures), la sonde est exposée à des températures telles que sous les tropiques, lors de son immersion, la sonde peut passer de $40^{\circ}C$ (température de l'air) à $27^{\circ}C$ (température de l'eau), ce qui peut affecter son fonctionnement électronique. Un autre problème est que certains capteurs mesurent des paramètres de l'eau non directement dans le milieu, mais pompée dans un circuit. Quelques dizaines de secondes sont nécessaires à l'amorçage et la purge complète de ce circuit. Afin de laisser le temps nécessaire à la stabilisation et amorçage de la sonde, celle-ci est maintenue en sub-surface (capteurs juste immergés) pendant au moins une minute. Dans cette configuration, il peut arriver que la sonde ressorte de l'eau à l'occasion d'une vague, ce qui se traduit par des données aberrantes à supprimer.

On trace donc le profil de la profondeur en fonction du temps, on vérifie ensuite que le maintien de l'instrument en sub-surface dépasse bien une minute et que les données ne fluctuent pas. On repère ainsi la profondeur de fin de palier et on élimine toutes les données, des paramètres mesurés, situées au-dessus de cette profondeur.

2.2.1 Elimination des données aberrantes de fond

Lorsque les sondes étaient déployées horizontalement (seconde campagne), le capteur se trouvait plus près du bas de la cage contenant la sonde. Lorsque la sonde atteignait le fond, elle soulevait un nuage de sédiment qui était lu par le capteur comme une concentration en matière en suspension anormalement élevée ; cette mesure a donc été supprimée. Néanmoins, la détection de cet événement indiquait la position du fond.

2.3 LISST 100 X (Laser In Situ Scattering and Transmissometry)

Le LISST 100X est un granulomètre laser (longueur d'onde d'émission $\lambda=670$ nm) in situ utilisant la théorie de Mie qui prévoit un angle de diffraction d'un faisceau laser proportionnel à la taille des objets interagissant avec les photons. La puissance du faisceau diffracté suivant un angle donné peut être reliée à la concentration volumique des objets correspondants. Le LISST 100X type C discrimine 32 classes de tailles réparties logarithmiquement dans la gamme comprise entre $2,5 \mu m$ et $500 \mu m$ (LISST-100X User's Manual version 5.0, Agrawal

& Pottsmith 2000). La fréquence d'acquisition sélectionnée était de 1 Hz (une mesure par seconde).

2.3.1 Distribution de la taille des floccs

Dans le cadre de notre étude, nous n'utiliserons que 30 classes de tailles car la première et la dernière classe sont entachées de 'bruit' (erreurs). On supposera les floccs de forme sphérique et par simplicité on définira les classes par leurs valeurs médianes notée D_v . Les diamètres médians D_v ont été calculés pour chaque distribution de classes de taille fournies par le LISST-100X. Les D_v sont déterminés comme étant le diamètre apparent correspondant aux 50% de la concentration volumique cumulée des agrégats.

On décompose les données de distribution des classes de taille par l'algorithme d'espérance-maximisation (Expectation Maximization : EM - Tsui 2009, Lefebvre et al. 2012), quatre modes de classe de taille ont été définis : les particules primaires ou flocculi ($<10 \mu\text{m}$), les microflocs fins ($< 40 \mu\text{m}$), les microflocs grossiers ($<100 \mu\text{m}$) et les macroflocs ($\geq 100 \mu\text{m}$) (fig. 3). Chaque mode est alors décrit par différents paramètres statistiques parmi lesquels, deux ont été utilisés dans cette étude : le diamètre médian apparent D_v (μm) et la concentration volumique relative (CVR %) définie comme le rapport de la concentration volumique du mode à la concentration volumique cumulée de tous les modes.

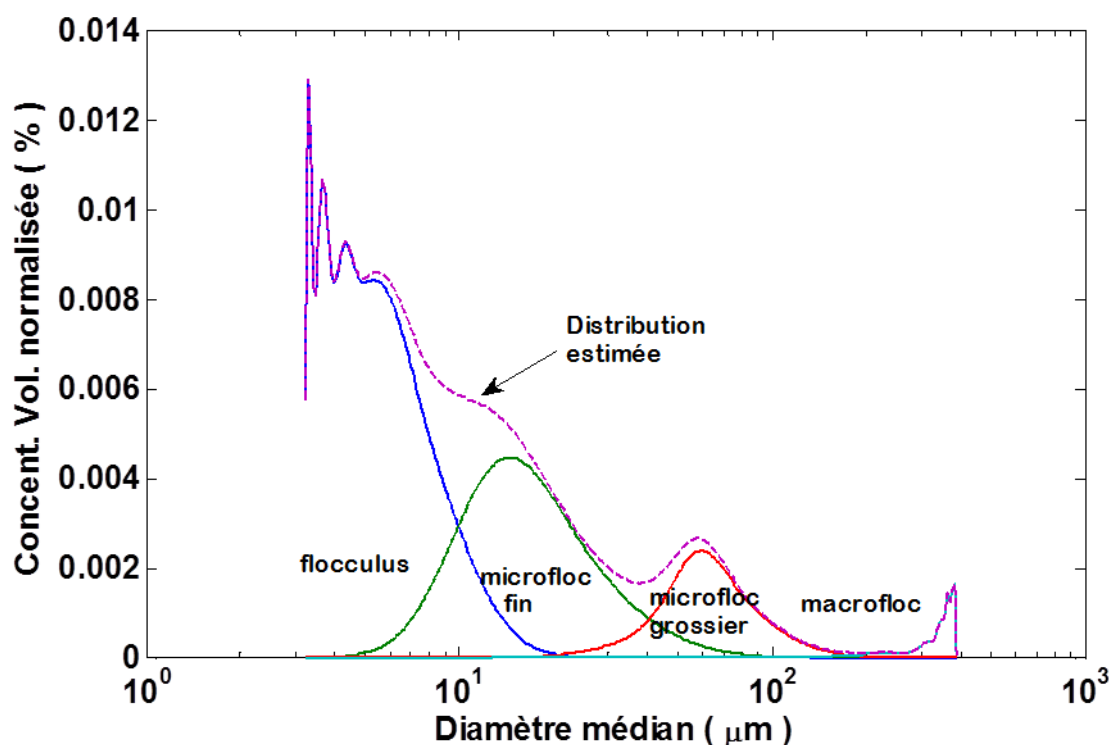


Figure 3. Décomposition des distributions de classes de taille en quatre modes : particule primaire ou flocculus, microfloc fin, microfloc grossier et macrofloc.

2.4 OBS (Optical Back-Scatter)

La turbidité est une mesure de la perte de transparence (limpidité) de l'eau. Elle est homogène à une teneur d'un fluide en composés qui perturbent la traversée de la lumière par absorption, diffusion ou réflexion. Elle est mesurée par le rapport entre la quantité d'énergie réfléchie et la quantité d'énergie d'une impulsion acoustique de fréquence connue émise dans le milieu par l'OBS. Ce rapport est proportionnel à la concentration d'objets présents dans l'eau susceptible de réfléchir ou rétrodiffuser le signal acoustique. Nous faisons l'hypothèse que dans le milieu côtier, les matières en suspension d'origine minérale sont principalement responsables de la turbidité de l'eau. Cette mesure s'exprime en Nephelometric Transparent Unit (NTU).

2.5 Mesure directe de SSC par prélèvement d'eau (bouteilles Niskin) et filtration

Afin de convertir la turbidité (NTU) en SSC (mg.L^{-1}), des mesures de calibration sont nécessaires. La concentration en sédiment en suspension est obtenue en faisant des échantillonnages de la colonne d'eau par bouteille Niskin descendue manuellement jusqu'à 1,5 m sous la surface. La profondeur est contrôlée au moyen d'une marque sur le bout de la corde (fig. 4). Cette eau est ensuite filtrée sur nucléopore, les minéraux recueillis seront ensuite séchés et pesés suivant les procédures décrites dans Lefebvre et al. (2012). Les échantillonnages ont été effectués toutes les 4 heures pendant 24 heures. Certains problèmes techniques ont retardé le premier prélèvement (H02_1, BC 1) et empêché le huitième prélèvement (H02_8, BC 1) de la campagne de la saison humide.



Figure 4. Echantillonnage d'eau de mer par bouteille Niskin.

2.5.1 Calibration de la turbidité en SSC

La concentration en matière en suspension de matériau solide (SSC, mg.L^{-1}) est estimée dans la colonne d'eau par régression linéaire simple de la gamme de SSC mesurées et turbidités correspondantes.

$$\text{SSC} = a \text{ Turbidité} + b \quad (1)$$

Le coefficient de corrélation linéaire est de l'ordre de 0,91 pour n=5 échantillons de la campagne BC1 (saison des pluies) par contre ce coefficient est de l'ordre de 0,764 pour n=5 échantillons de la campagne BC2. L'écart entre les deux campagnes, compatible avec la dérive inhérente de ces appareils, ne dénote pas un dysfonctionnement de la sonde. La calibration est appliquée aux données de turbidité en fonction de la campagne (fig. 5).

| | BC1 | BC2 |
|----------------------|---------------|--------------|
| a | 1,46 | 1,1 |
| b | -10,26 | -3,52 |
| r² | 0,91 | 0,764 |

Tableau 1. Facteur de proportionnalité des deux campagnes, a pente de la droite, b ordonnées à l'origine et r² coefficient de détermination.

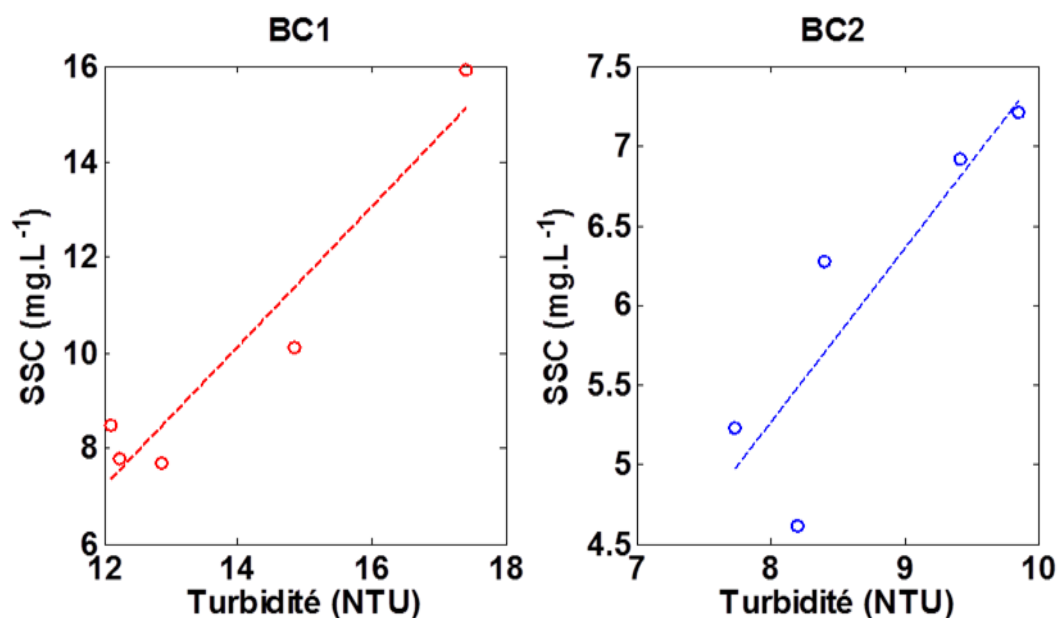


Figure 5. Calibration de la turbidité en SSC : saison humide (rouge) et saison sèche (bleu).

2.6 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

L'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, Teledyne's RDI Workhorse Sentinel 1200 kHz) permet la mesure des vitesses et directions de l'écoulement par effet Doppler, et ce à plusieurs profondeurs (cellules) le long de la colonne d'eau. Durant les deux campagnes, l'espacement des cellules de mesure était fixé à 25 cm et leur nombre à 125. Il existe une zone aveugle près du capteur, où la mesure est bruitée. Cette zone aveugle, correspondant aux limites de fonctionnement de l'ADCP, indique que la première mesure valide était distante de 73 cm de l'appareil. L'influence du fond entache la mesure à proximité d'un bruit important; il faut donc détecter et exclure cette cellule ainsi que celles correspondantes à des profondeurs supérieures (fig. 6). Compte tenu de ces paramètres et de la profondeur maximale à la station H02, l'écoulement de la colonne d'eau était discrétisé le long d'une soixantaine de cellules. Les

mesures sont sélectionnées et exportées au format Matlab grâce au logiciel Winriver II et traitées par des routines développées sous Matlab.

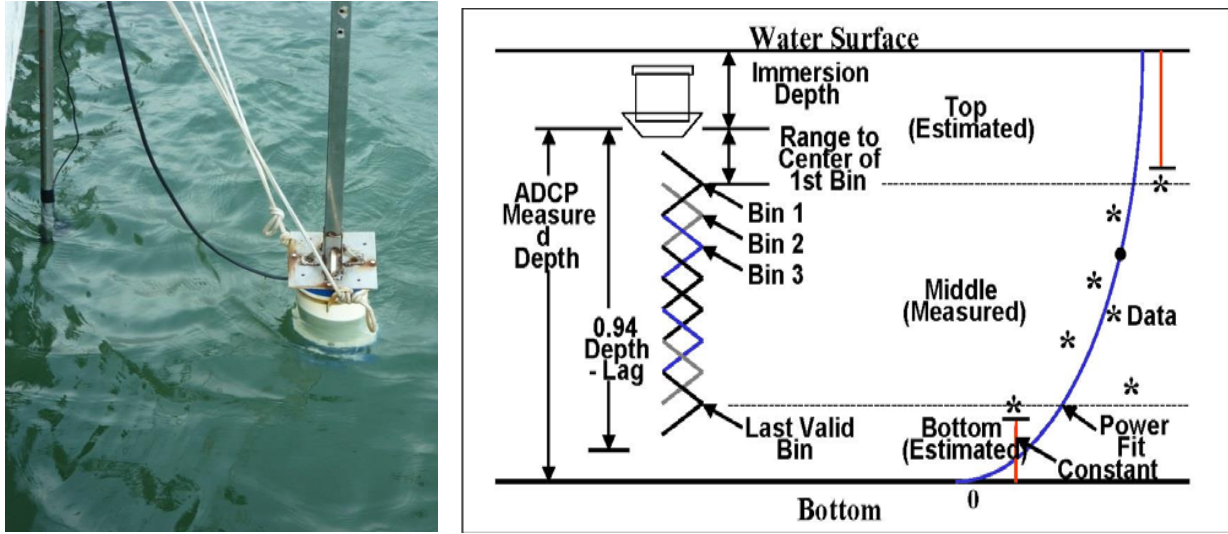


Figure 6. Déploiement (gauche), principe de fonctionnement de l'ADCP et traitement de mesures (droite).

2.6.1 Paramètres hydrodynamiques

Le taux de dissipation de l'énergie cinétique représente la vitesse à laquelle l'énergie cinétique des grands tourbillons est absorbée pour créer des tourbillons turbulents plus petits, jusqu'au moment où l'énergie est dissipée par la viscosité du fluide sous forme de chaleur. Cette grandeur s'exprime comme la perte d'énergie cinétique turbulente par unité de masse et par seconde (ε , $m^2.s^{-3}$). Elle est donc constante quelque soit la taille des tourbillons concernés. On estime le taux de dissipation moyen, intégrée sur la colonne d'eau, en fonction de la vitesse moyenne du vent et de la vitesse moyenne du courant (van der Lee et al. 2009, Lefebvre et al. 2012) :

$$\varepsilon = K_b \frac{U^3}{h} + K_s \frac{W^3}{\psi.h} \quad (2)$$

où K_b et K_s sont respectivement les coefficients de friction de l'écoulement au fond et en surface, W la vitesse du vent, U la vitesse moyenne sur la colonne d'eau, h la hauteur de la colonne d'eau et ψ le rapport entre la densité de l'air et la densité de l'eau.

Les données de vitesse et direction de vent utilisées proviennent de la station météorologique installée sur le toit de l'IMER à Haiphong, station la plus proche du site de mesure. Les données sont acquises toutes les 30 minutes et couvrent la période des deux campagnes. La vitesse du vent pour chaque profil a été estimée par interpolation.

La micro-échelle de Kolmogorov (λ_k , μm) est l'échelle à laquelle l'énergie cinétique turbulente du plus petit tourbillon est transformée en chaleur par la viscosité cinématique du fluide. Elle est du même ordre de grandeur que les plus grands floes (Lefebvre et al. 2012) .

Elle est exprimée en fonction de la viscosité cinématique (ν , $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) du fluide et du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (ε) intégrée sur la colonne:

$$\lambda_k = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Le taux de cisaillement turbulent G (s^{-1}), est exprimé comme étant la racine carrée du rapport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente et la viscosité cinématique du fluide (ν). Il représente le gradient de vitesse absolu.

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \quad (4)$$

2.7 Stratification haline

La stratification de l'écoulement est un paramètre fondamental. Lorsque la colonne d'eau est fortement stratifiée, les sédiments présents dans une couche, soit de surface (eau douce) ou de fond (eau salée) tendent à rester piégés dans ces couches, la discontinuité de densité entre ces deux compartiments agissant comme un obstacle à la propagation verticale de la turbulence. L'homogénéisation de la SSC le long de la colonne d'eau n'est plus assurée par l'advection turbulente verticale (K_z , $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) (Lefebvre 2014).

La stratification de la colonne d'eau est quantifiée comme l'anomalie de l'énergie potentielle de la colonne d'eau ϕ ($\text{J}.\text{m}^{-3}$) (Simpson et al. 1990). Elle résulte de différents facteurs tels la turbulence de l'écoulement, des précipitations, du flux de chaleur ou du vent. L'anomalie de l'énergie potentielle indique la quantité d'énergie nécessaire au mélange d'une unité de volume d'eau.

$$\phi(t) = \frac{g}{h} \sum_{z=0}^h [\bar{\rho}_w(t) - \rho_w(z, t)] z \Delta z \quad (5)$$

où ρ_w est la densité de l'eau calculée à partir du profil de densité de la colonne d'eau (Millero et al. 1980, Fofonoff & Millard 1983), g l'accélération due à la gravité (9.79 m.s^{-2} à Halong), h la profondeur de l'eau et $\bar{\rho}_w$, la moyenne de la densité sur la colonne d'eau défini comme :

$$\bar{\rho}_w(t) = \frac{1}{h} \sum_{z=0}^h \rho_w(z, t) \Delta z \quad (6)$$

3 RESULTATS

Du fait de la défaillance matérielle mentionnée précédemment, les profils incomplets mesurés lors de BC1 ne permettent pas d'obtenir des mesures moyennées sur la colonne d'eau pour cette campagne.

3.1 Concentration de sédiments en suspension (SSC)

Pendant la saison sèche, la SSC intégrée sur la colonne et moyennée sur le cycle de la marée était de $8,70 \text{ mg.L}^{-1}$ (tab. 2). La variation relative de SSC définie comme la différence entre le maximum et le minimum divisée par la moyenne est égale à 0,98.

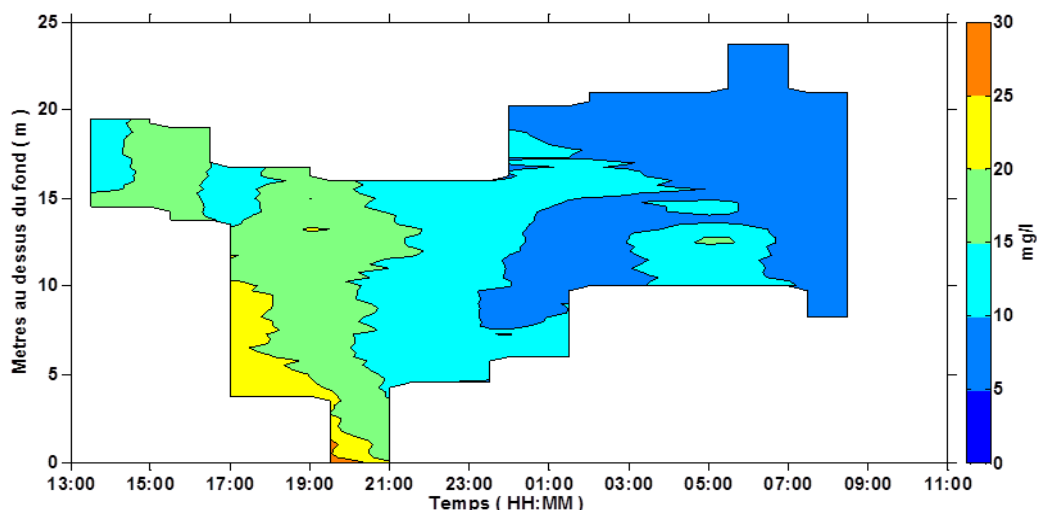
La comparaison de la SSC sur le même compartiment indique une SSC plus élevée en saison humide qu'en saison sèche et pendant le jusan qu'au flot en saison humide et inversement en saison sèche.

| SSC (mg.L^{-1}) | min | max | moyenne |
|----------------------------|------|-------|---------|
| BC 2 | 5,58 | 14,16 | 8,70 |

Tableau 2. Moyenne intégrée sur la colonne d'eau et moyennée sur le cycle de la marée de la concentration en sédiments en suspension pendant BC2.

Pendant la saison humide, malgré les profils incomplets, on observe tout de même une forte concentration de SSC sur la colonne d'eau pendant le jusan. Cette concentration augmente de la surface en profondeur et est maximale vers le fond. La concentration de SSC minimale se remarque en surface à l'étale de la basse mer jusqu'à la pleine mer.

Pendant la saison sèche, la SSC est importante dans la colonne d'eau pendant le flot que le jusan (resp. $10,3 \text{ mg.L}^{-1}$ et $7,38 \text{ mg.L}^{-1}$), elle est associée à une couche de forte concentration près du fond à la fin du flot et relativement faible pendant la fin du jusan. Le maximum de SSC atteint $14,16 \text{ mg.L}^{-1}$ pendant le flot et $8,45 \text{ mg.L}^{-1}$ pendant le jusan. La turbidité minimale dans la colonne s'observe à l'étale de la pleine mer et de la basse mer (fig. 7).



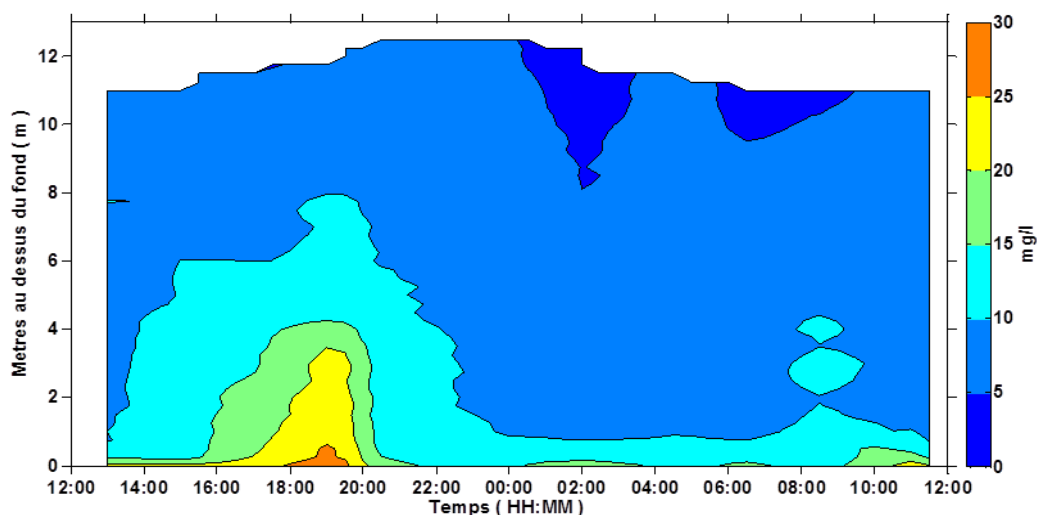


Figure 7. Concentration de sédiments en suspension durant le cycle de marée pendant la saison humide (haut) et pendant la saison sèche (bas).

3.2 Salinité

La salinité dans la colonne d'eau en estuaire varie au cours des saisons (crue ou étiage) et en fonction du régime de la marée. La variation de la salinité sur la colonne d'eau en saison humide est importante qu'en saison sèche. En effet, en saison humide, le débit fluvial est plus fort. Lors de BC1, ce débit était encore renforcé par des courants de marées importants (marée de vive eau). A l'inverse en saison sèche, le débit fluvial est faible. Durant BC2, le marnage était également faible.

| Salinité | min | max | moyenne |
|----------|-------|-------|---------|
| BC 2 | 27,57 | 28,76 | 28,25 |

Tableau 3. Salinité intégrée sur la colonne d'eau et moyennée sur le cycle de la marée pendant BC2.

Pendant la saison humide, le minimum de salinité est observé près de la surface pendant l'étale de basse mer et le début du flot, suivi d'une augmentation à mi-flot jusqu'à la pleine mer. La salinité est maximale près du fond pendant le flot et l'étale de la pleine mer. On note une intrusion d'eau marine d'environ 10 m au-dessus du fond à la pleine mer (fig.8).

Pendant la saison sèche, on observe la même configuration qu'en saison humide avec toutefois une épaisseur moindre de la couche d'eau marine, n'atteignant qu'environ 4 mètres au-dessus du fond lors de la pleine mer. La salinité de la colonne d'eau varie légèrement autour d'une valeur moyenne de 28,25 sur le cycle de la marée (tab. 3).

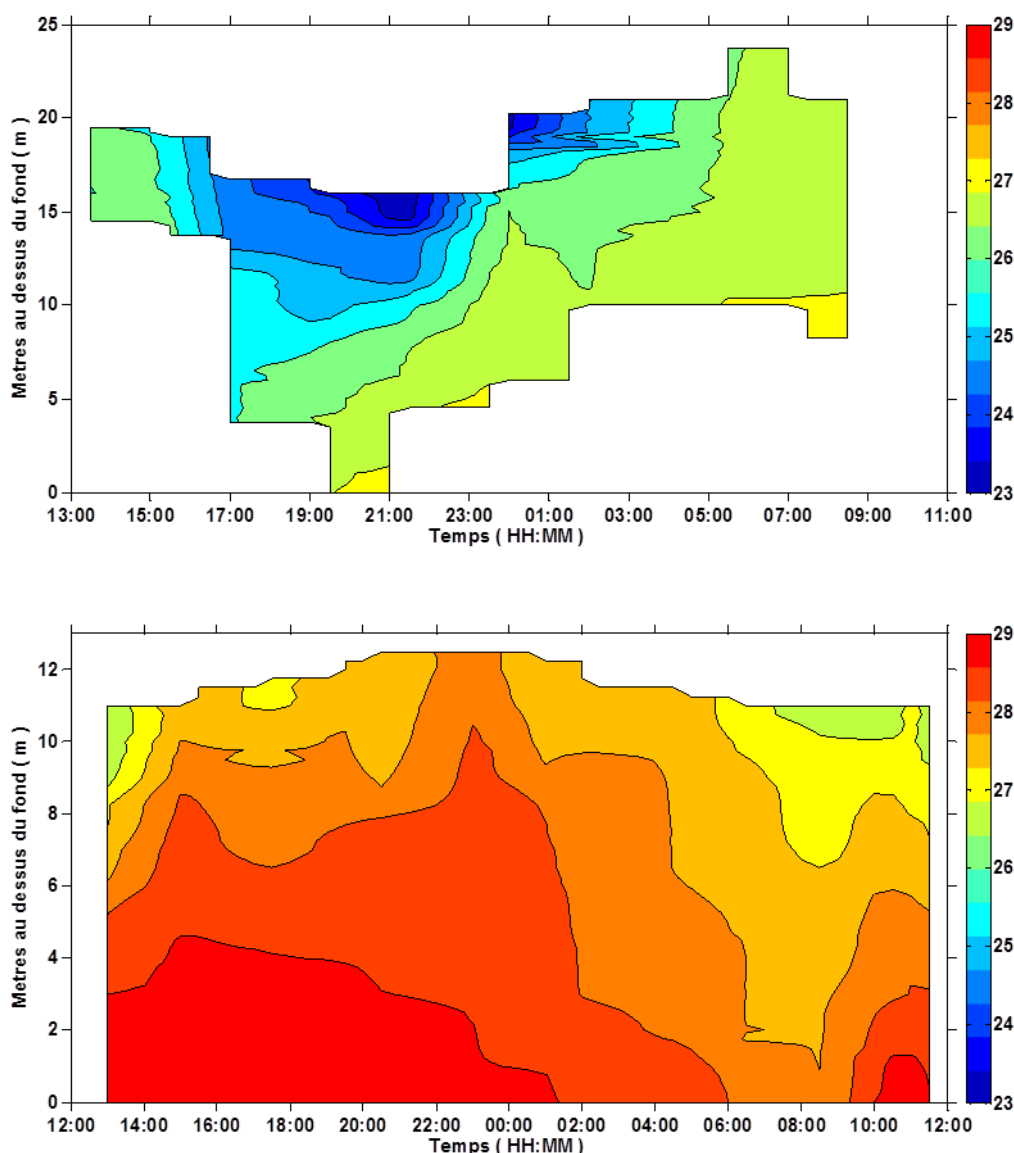


Figure 8. Distribution de la salinité durant le cycle de marée pendant la saison humide (haut) et la saison sèche (bas).

3.3 Amplitude et direction de l'écoulement

Alors que les courants fluviaux sont orientés vers l'aval, les courants de marées sont orientés vers l'amont pendant le flot et vers l'aval pendant le jusant. La compensation ou l'opposition de ces deux courants (courant fluvial et courant de marée) détermine l'amplitude et la direction de l'écoulement notée positivement vers l'aval. Du fait de la faible intensité des courants de marée dans cette zone, l'amplitude de l'écoulement est pratiquement symétrique entre jusant et flot pendant les deux saisons (vers l'aval au jusant et vers l'amont au flot). L'amplitude de l'écoulement est plus élevée en saison humide qu'en saison sèche (fig. 9).

Pendant la saison humide, la distribution du courant est homogène dans la colonne d'eau. Le courant est maximal et dirigé vers l'amont à mi-flot avec une forte signature dans la couche du milieu alors qu'il est maximal dirigé vers l'aval à mi-jusant toujours avec une forte

signature dans la couche du milieu. L'étale de la basse mer est plus longue que l'étale de la pleine mer.

Pendant la saison sèche, la distribution du courant dans la colonne d'eau est homogène de la pleine mer à la basse mer. Pendant le flot on observe un courant dirigé vers l'aval en surface et un courant dirigé vers l'amont sur le reste de la colonne. Ceci entraîne une stabilité de la stratification haline pendant cette période du cycle de la marée. On observe un courant dirigé vers l'amont à mi-flot et à la fin du jusant avec une forte signature dans la couche de fond. Ce courant est faible à la fin du jusant qu'à mi-flot. De la pleine mer au début du jusant le courant est dirigé vers l'aval et est maximal au début du jusant dans la colonne.

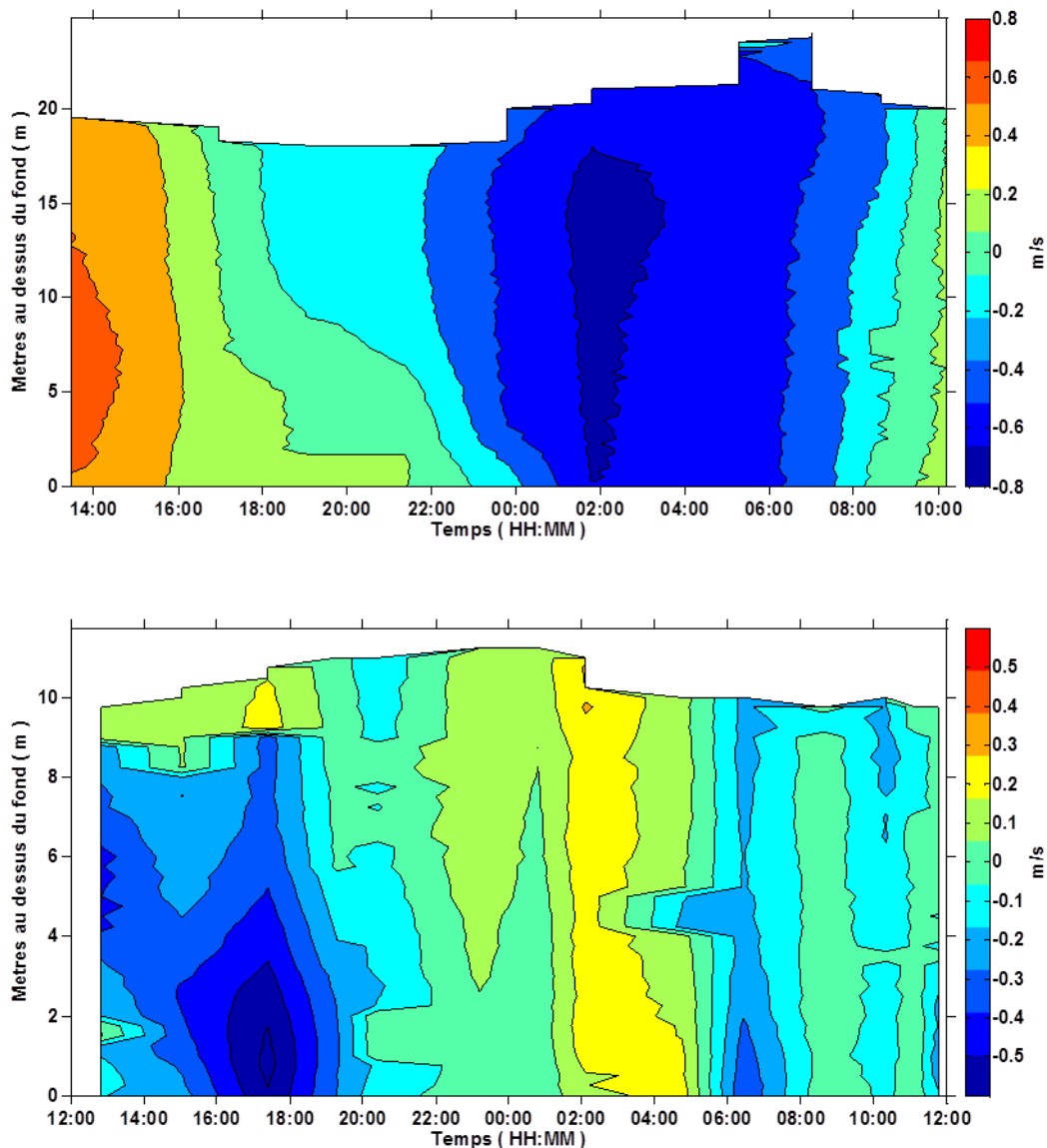


Figure 9. Amplitude du courant (m.s^{-1}) avec direction aval-amont dans la colonne d'eau durant le cycle de la marée pendant la saison humide (haut) et la saison sèche (bas).

3.4 Distribution de la taille des floccs (Diamètre médian apparent D_v)

Les tailles minimales des particules dans les modes sont relativement plus larges en saison humide qu'en saison sèche (tab. 4). Le mode des macrofloccs est dominant sur le cycle de la marée pendant la saison humide tandis que les modes de flocculi et de microflocs fins prédominent pendant la saison sèche.

| Taille D_v (μm) | | flocculus | m. fin | m. grossier | macrofloc |
|--------------------------------|-----|-----------|--------|-------------|-----------|
| min | BC1 | 5 | 17 | 51 | 132 |
| | BC2 | 3 | 10 | 57 | 102 |
| max | BC1 | 5 | 19 | 57 | 270 |
| | BC2 | 6 | 22 | 84 | 362 |
| moyenne | BC1 | 5 | 18 | 52 | 161 |
| | BC2 | 4 | 12 | 66 | 191 |

Tableau 4. Variation de la taille des particules pendant les deux campagnes BC1 et BC2.

Pendant la saison humide, les tailles des floccs sont plus larges pendant la basse mer jusqu'au début du flot et pendant la pleine mer, il s'agit des macrofloccs. Les plus gros macrofloccs s'observent en surface au début du flot et à l'étale de la pleine mer. Les modes de flocculus, de microflocs fins et grossiers s'observent au début de la basse mer et au flot avec une présence marquée des flocculi à mi-flot. Du jusant jusqu'à la fin du flot, on observe une couche de flocculi près de la surface (fig. 10).

Pendant la saison sèche, on note une distribution homogène des tailles des floccs dans la colonne. Les tailles des floccs sont plus larges pendant le jusant qu'au flot. On observe les macrofloccs près de la surface à mi-jusant. Du mi-jusant à l'étale de la basse mer, on observe des microflocs sur toute la colonne d'eau. Les flocculi s'observent du flot à mi-jusant et à la fin de la basse mer (fig. 10).

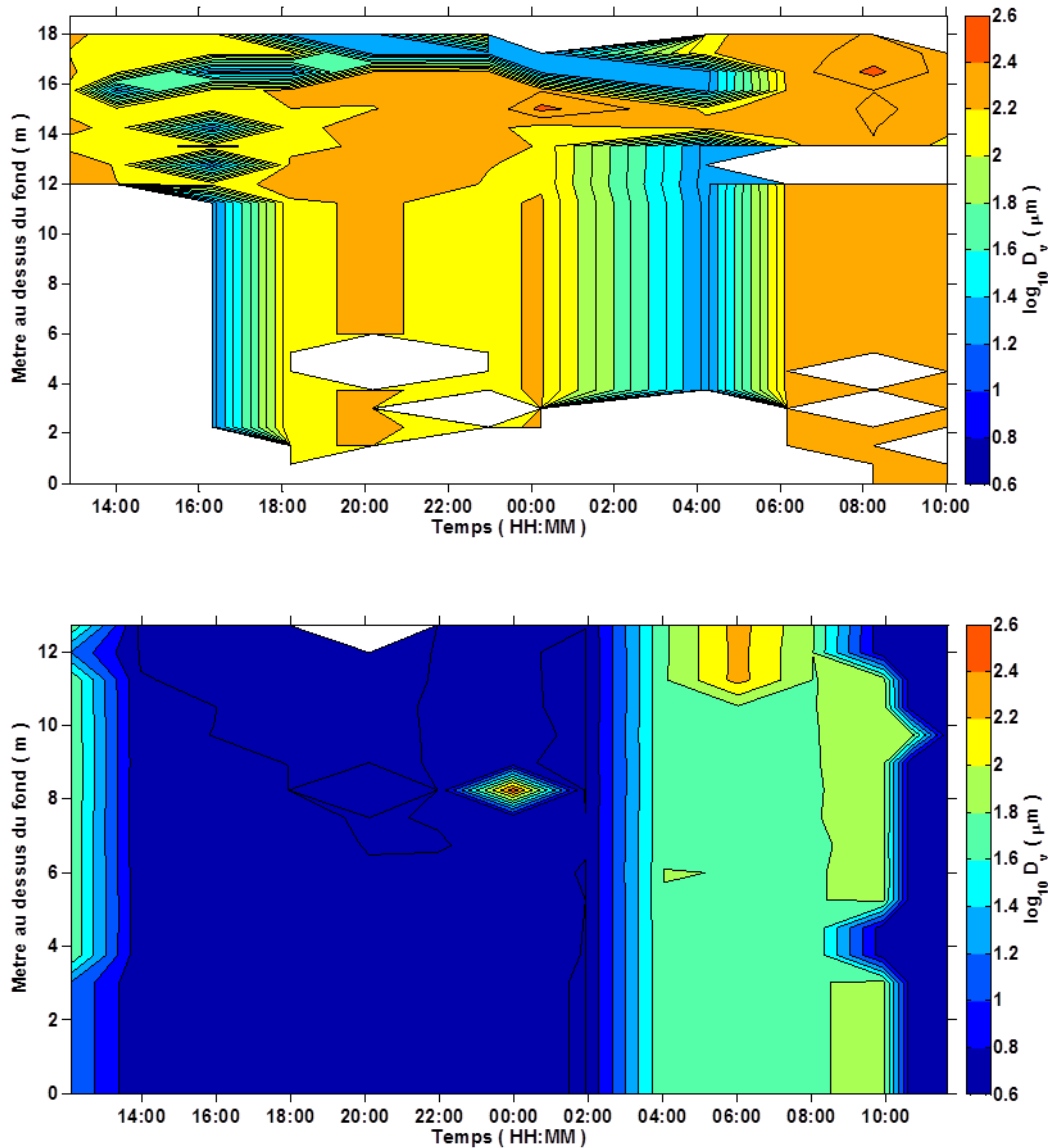


Figure 10. Distribution de D_v sur le cycle de la marée pendant la saison humide (haut) et la saison sèche (bas).

3.5 Distribution de la concentration volumique relative (CVR) des floccs durant le cycle de la marée

La méthode utilisée pour déterminer les spectres des différents modes des floccs autorise une légère fluctuation du diamètre médian apparent des modes, mais ce diamètre (D_v) reste quasiment inchangé quelque soit le spectre. Ainsi, seule la concentration volumique relative des modes varie sur la colonne d'eau et sur le cycle de la marée.

Le diamètre médian apparent D_v , des 4 modes obtenus à la suite de l'analyse combinée des spectres de distribution de concentration volumique et de taille des floccs fournies par le LISST sont : $<10 \mu\text{m}$, $<40 \mu\text{m}$, $<100 \mu\text{m}$ et $\geq 100 \mu\text{m}$. Le premier composant correspond au mode des particules primaires ou flocculi. Le deuxième et le troisième, correspondent aux modes des microflocs fins et grossiers. Le dernier correspond au mode des macroflocs.

| CVR (%) | | flocculus | m. fin | m. grossier | macrofloc |
|---------|-----|-----------|--------|-------------|-----------|
| min | BC1 | 3,45 | 8,83 | 9,07 | 26,75 |
| | BC2 | 0 | 0,01 | 8,81 | 0,66 |
| max | BC1 | 13,61 | 34,86 | 28,25 | 78,10 |
| | BC2 | 99,98 | 42,09 | 68,91 | 65,42 |
| moyenne | BC1 | 10,17 | 28,17 | 23,10 | 38,31 |
| | BC2 | 68,52 | 9,32 | 42,77 | 16,69 |

Tableau 5. Variation de la CVR des particules pendant les deux campagnes BC1 et BC2.

Les quatre classes de tailles sont présentes dans la colonne d'eau pendant la saison humide sur le cycle de la marée contrairement à la saison sèche où les modes de microflocs grossiers et macroflocs n'apparaissent que pendant le jusant (c'est à dire sur la moitié du cycle de la marée) (fig. 11). Sur le cycle de la marée la distribution des CVR fluctue dans la couche de surface et est homogène vers le fond (à partir de 10 mètre au-dessus du fond pour la saison humide et 4 mètres au-dessus du fond pour la saison sèche (annexe fig. B et C)). La variation de la CVR ($CVR_{max} - CVR_{min}$) des flocculi et des microflocs est plus grande en saison sèche qu'en saison humide (tab. 5). Cette variation est d'ordre 10 fois celle de la saison humide pour les flocculi, deux fois pour les microflocs fins et trois fois pour les microflocs grossiers.

Pendant la saison humide, la CVR du mode des macroflocs est la plus élevée suivie du mode des microflocs et le mode des flocculi à la proportion minimale dans la colonne d'eau sur le cycle de la marée. La CVR des modes de flocculi et microflocs augmente de la surface vers le fond du mi-flot à la basse mer et inversement sur le reste du cycle. Au contraire, la CVR des macroflocs diminue de la surface vers le fond du jusant à mi-flot et inversement sur le reste du cycle. La CVR des flocculi varie entre 6% et 13 % sur le cycle de la marée (fig.11). Celles des microflocs fins et grossiers varient respectivement entre 20% et 35% et 18% à 28% avec la valeur minimale en début de flot et la maximale à mi-flot. La CVR maximale des macroflocs atteint 60% au début du flot et varie entre 25 et 60%.

Pendant la saison sèche, la CVR du flocculus est élevée dans la colonne d'eau au flot qu'au jusant (fig.11). Celle-ci dépasse les 90% près de la surface et légèrement inférieure en profondeur pendant le flot. Elle décroît jusqu'à environ 25 % à l'étale de la pleine mer. Pendant le jusant, la CVR croît légèrement jusqu'à la basse mer. La CVR du microfloc fin est maximale environ 10% près du fond à mi-flot et à mi-jusant, dû probablement à la remise en suspension des sédiments du fond ou à l'érosion du lit. Les microflocs grossiers s'observent à partir du mi-jusant jusqu'à la basse mer avec une CVR (50%) supérieure à celle des microflocs fins. Cette CVR croît légèrement de la surface au fond où elle est quasi constante à partir de 4 mètre au-dessus du fond. On observe une CVR maximale des macroflocs à mi-jusant (environ 20%) dans la colonne d'eau, celle-ci décroît de la surface au fond.

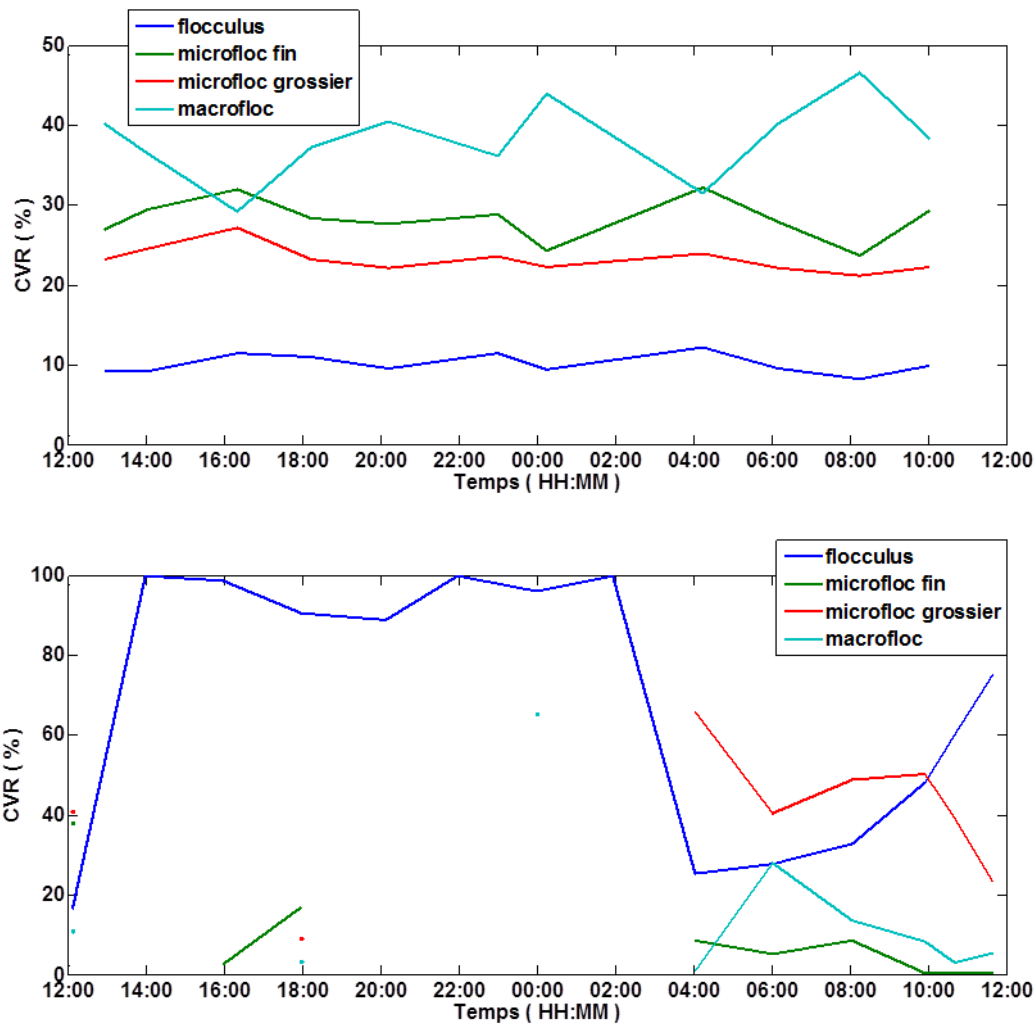


Figure 11. Variation de la CVR des floes pendant la campagne BC1 (haut) et BC2 (bas).

3.6 Turbulence

La micro-échelle de Kolmogorov (λ_k) moyennée sur le cycle de la marée augmente de la saison humide à la saison sèche (respectivement 165 μ m et 312 μ m). Le λ_k moyen de la saison sèche est deux fois supérieur à celle de la saison humide (tab. 6). La colonne d'eau serait alors plus turbulente en saison humide qu'en saison sèche. La variation de la micro-échelle de Kolmogorov ($\lambda_{kmax} - \lambda_{kmin}$) sur le cycle de la marée pendant la saison sèche est deux fois supérieure à celle de la saison des pluies. Les valeurs instantanées minimales et maximales de la turbulence sont faibles en saison humide qu'en saison sèche.

| λ_k (μ m) | min | max | moyenne |
|------------------------|-----|-----|---------|
| BC 1 | 94 | 294 | 165 |
| BC 2 | 162 | 548 | 312 |

Tableau 6. Micro-échelle de Kolmogorov (μ m) durant le cycle de la marée pour les deux campagnes.

3.7 Stratification

La stratification haline détermine le niveau du mélange des eaux marines et fluviales dans l'estuaire. Elle est déterminée par plusieurs méthodes mais dans ce rapport, elle est estimée par le paramètre de Simpson notée ϕ ($J.m^{-3}$). Plus la valeur de ce paramètre est grande plus la colonne est stratifiée donc nécessiterait beaucoup d'énergie pour mélanger les eaux salées et douces. La stratification peut constituer un obstacle à l'advection verticale de la turbulence dans la colonne d'eau (Geyer 1993); ceci aurait un effet sur l'advection verticale et la vitesse de chute des particules.

| ϕ ($J.m^{-3}$) | Min | max | moyenne |
|-----------------------|------|------|---------|
| BC 2 | 2,49 | 2,65 | 2,56 |

Tableau 7. Paramètre de Simpson ϕ ($J.m^{-3}$) moyennée sur le cycle de la marée pendant BC2.

Pendant la saison humide, l'influence fluviale prédomine malgré un fort coefficient de marée. La colonne d'eau n'est pas ou peu stratifiée, ce qui s'observe également sur les profils d'écoulement et sur les profils de SSC.

Pendant la saison sèche, la colonne d'eau est stratifiée (tab. 7). Cette stratification est stable au début du flot et augmente légèrement du flot jusqu'à l'étale de la pleine mer. Par contre elle varie avec beaucoup de fluctuations du jusant à la basse mer et atteint sa valeur minimale à mi- jusant (fig. 12).

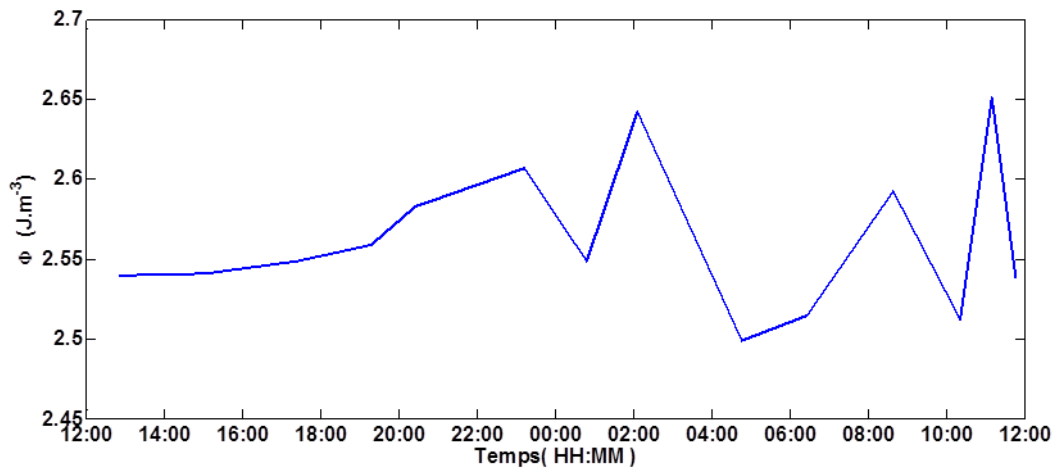


Figure 12. Niveau de la stratification haline de la colonne d'eau durant le cycle de la marée pendant la saison sèche.

3.8 Turbulence et concentration de sédiments en suspension (SSC)

Pendant la saison sèche, la régression linéaire simple entre la SSC et λ_k est significative moyennant un décalage entre ces deux mesures; une variation de turbulence n'engendrant une variation significative de la SSC qu'après un délai de 2 heures (fig. 13). Pour $G > 1,5 s^{-1}$, le taux de cisaillement turbulent provoque une mobilisation et remise en suspension des particules dans la colonne d'eau.

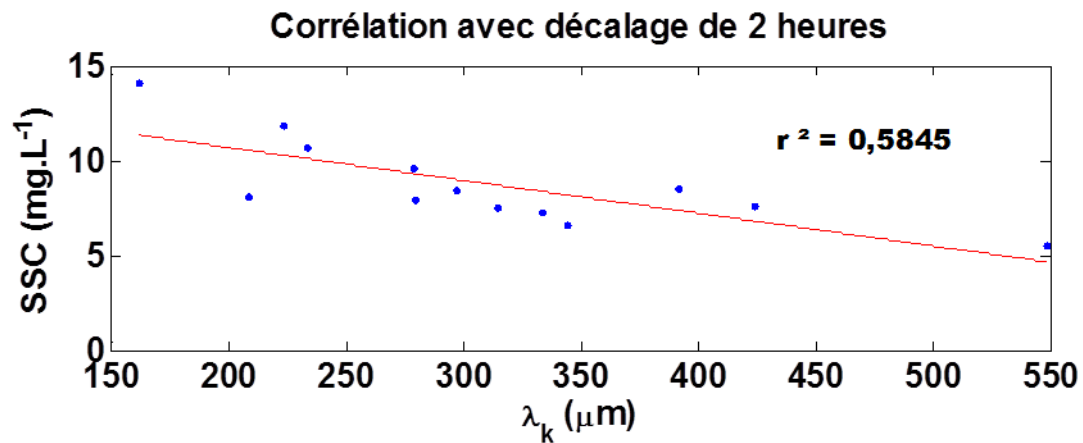


Figure 13. Corrélation linéaire entre la SSC et λ_k de la campagne BC2.

3.9 Turbulence et distribution des concentrations volumiques relatives et taille des floccs

Une turbulence élevée provoque à la fois la rupture ou l'agrégation des floccs or ces deux processus gouvernent le passage du mode des flocculi au mode de microflocs et vice versa. La variation de la taille et de la concentration volumique relative (CVR) des floccs dépendent essentiellement du transfert entre les différentes classes de taille de floccs.

Les tailles minimales des particules sont plus larges dans les quatre modes en saison humide qu'en saison sèche. Au contraire, les tailles maximales des floccs sont plus grandes en saison sèche (tab. 4).

Pendant la saison humide, la taille des particules est quasi inchangée sur le cycle de la marée (fig. 14a). La variation de CVR des floccs s'observe essentiellement entre les microflocs fins et les macroflocs. Lorsque $\lambda_k < 135 \mu\text{m}$, on note une légère baisse de la CVR des macroflocs et une légère augmentation de la CVR des trois autres modes (essentiellement les microflocs fins) vers la fin du jusant et à mi-flot. Cette diminution correspondrait à une rupture des macroflocs. A l'inverse, de la basse mer jusqu'au début du flot et à la pleine mer, la CVR des macroflocs a légèrement augmentée et la CVR des autres modes légèrement diminuée. Ceci correspondrait à une floculation des microflocs fins en macroflocs.

Pendant la saison sèche, la taille des floccs est petite pendant le flot et large pendant le jusant. Les tailles des floccs diminuent au début du flot, on note une augmentation de la CVR du mode des flocculi qui passe de 0 à 99% et une disparition totale des floccs des modes microflocs et macroflocs. Ceci est due à une désagrégation des microflocs et macroflocs en flocculus. Plus les modes correspondent à un diamètre faible, plus les agrégats correspondant sont denses et résistants. Les floccs dont la résistance mécanique n'excède pas le cisaillement turbulent (G), proportionnel au taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (eq. 4) sont réduits à des arrangements plus petits et plus denses, jusqu'à ce que la résistance mécanique de ces derniers excède G . Dans le cas extrême, seuls les agrégats les plus petits et les plus compacts (flocculi, $D_v < 10 \mu\text{m}$) satisfont à cette condition (fig. 14b). A mi-jusant, on observe une diminution importante de la CVR des flocculi (10%), une légère augmentation de la taille des flocculi et

en même temps une apparition du mode des microflocs grossiers sur la toute colonne et les macroflocs vers le fond. L'augmentation de la proportion des microflocs et macroflocs sur toute la colonne est due à la décantation différentielle.

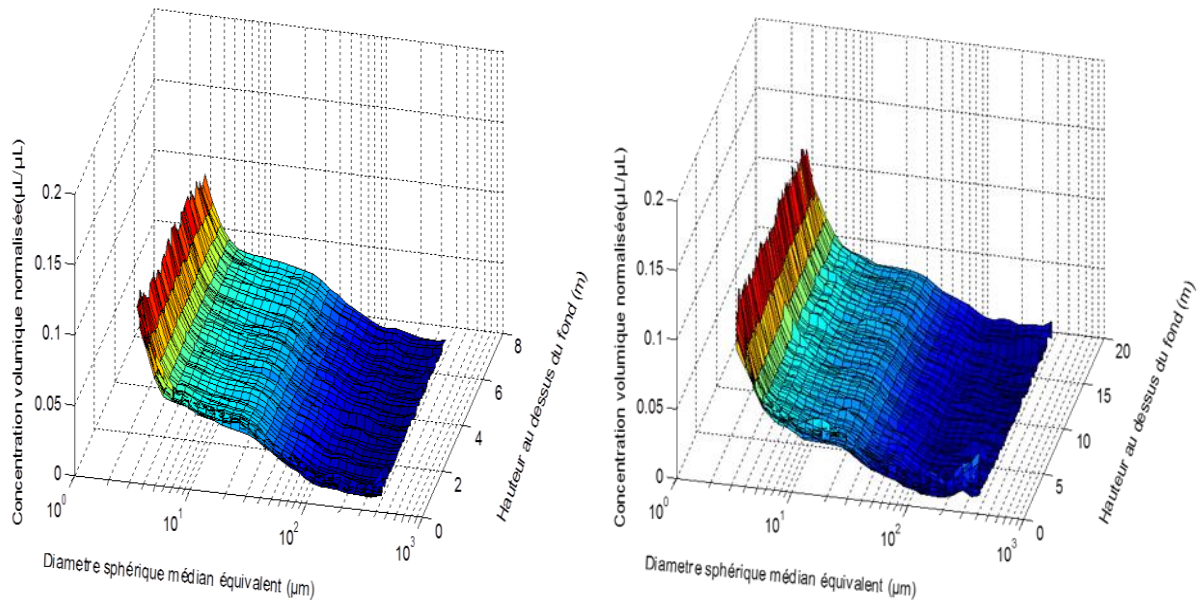


Figure 14a. Distribution de la concentration volumique des flocs en fonction du diamètre médian apparent et de la profondeur au jusan (20 oct. 2012 14:00) et à pleine mer (21 oct. 2012 08:14) de la saison humide.

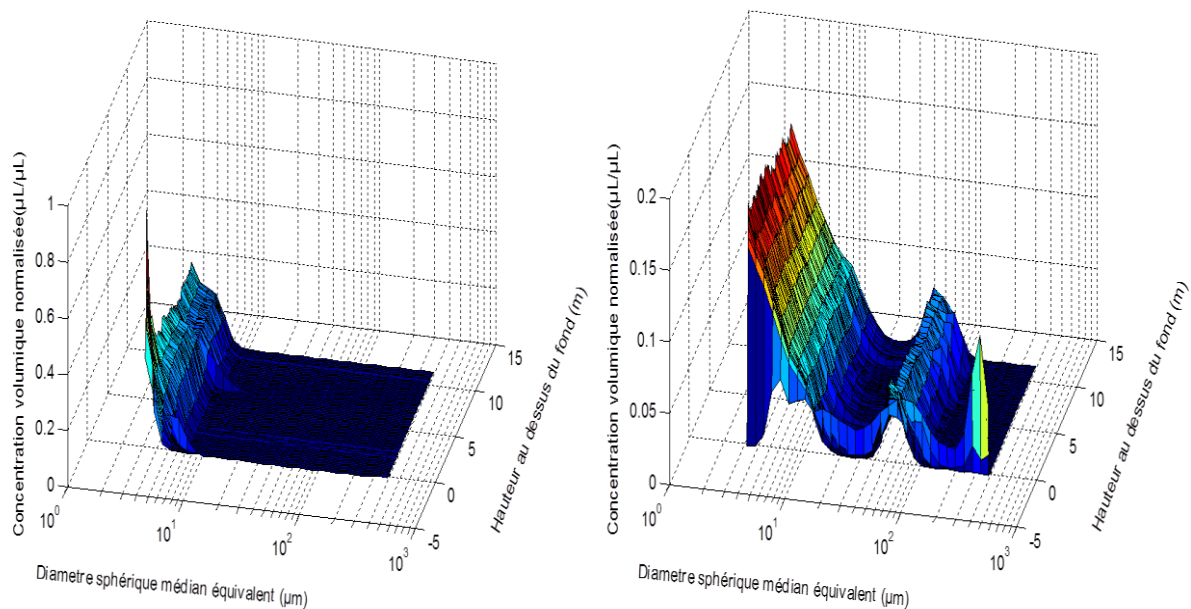


Figure 14b. Distribution de la concentration volumique des flocs en fonction du diamètre médian apparent et de la profondeur au début du flot (18 mai 2013 13:57) et à mi- jusan (19 mai 2013 04:01) de la saison sèche.

4 DISCUSSIONS

Les profils incomplets de la saison humide induisent des biais dans les résultats et leurs interprétations pouvant compromettre certaines de nos conclusions.

4.1 Turbulence et SSC

L'écoulement mesuré en saison des pluies était plus turbulent qu'en saison sèche (micro-échelle de Kolmogorov minimale et maximale instantanées de la saison humide inférieure à celle de la saison sèche). La composante tidale étant proportionnellement plus importante en saison sèche, on note une variabilité du niveau de turbulence durant un cycle de marée plus marquée qu'en saison des pluies.

En saison sèche, la turbidité est élevée dans la colonne d'eau lorsque l'écoulement est stratifié (les courants forts sont dirigés en amont vers le fond pendant le flot). Cette stratification empêche les particules en suspension d'atteindre la surface concentrant ainsi ces dernières dans la couche de fond. A l'inverse, pendant la saison des pluies, la turbidité maximale est mesurée pendant le jusan lorsque les composantes tidales et fluviales s'additionnent (écoulement vers l'aval). Les particules en suspension sont distribuées sur toute la colonne d'eau.

Compte tenu de la forte variabilité de la turbulence pendant la saison sèche, on remarque deux pics de SSC sur le cycle de la marée. Le premier pic, plus élevé, s'observe à mi-flot et le second, plus faible, à la fin du jusan. La turbulence à mi-flot, étant supérieure à celle du jusan, favorise la remobilisation des particules et leur transport dans la colonne d'eau tandis que la turbidité observée pendant le jusan (pendant lequel la turbulence est moins forte), provient de la ré-suspension d'une partie des particules déposées par décantation différentielle pendant l'étalement.

Le décalage d'environ deux heures entre la turbulence et le pic de la concentration des sédiments en suspension dans la colonne est dû au temps de transport des sédiments mobilisés dans la couche de fond vers la couche de surface.

Pendant la saison humide, un seul pic de turbidité s'observe et ceci seulement pendant le jusan. La composante fluviale étant prédominante, la composante tidale n'a une action significative qu'au jusan où elle favorise la ré-suspension des sédiments déposés.

4.2 Paramètres hydrodynamiques et distribution de tailles des floccs

Pendant les deux campagnes, quatre classes de tailles des floccs ont été définies : le mode des flocculi ($< 10 \mu\text{m}$), le mode des microflocs fins ($< 40 \mu\text{m}$), le mode des microflocs grossiers ($< 100 \mu\text{m}$) et le mode des macroflocs ($\geq 100 \mu\text{m}$).

Les résultats montrent que les tailles minimales des particules sont plus larges pendant la saison humide qu'en saison sèche et les tailles maximales plus petites. En effet, la turbulence étant plus élevée dans la colonne d'eau pendant la saison humide qu'en saison sèche, elle

permet l'augmentation de la taille des flocculi et limite plus efficacement la taille des macroflocs en saison humide qu'en saison sèche.

Pendant la saison sèche, la répartition de taille des flocs est largement dominée par les flocculi pendant le flot. Des flocs plus larges sont formés (microflocs et de macroflocs), du jusant à l'étalement de basse mer. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation du taux de cisaillement turbulent pendant le flot ($G \gg 1,5 \text{ s}^{-1}$) entraînant des remobilisations de particules et des ruptures d'agrégats plus larges (désagrégation). La stratification en piégeant les particules en suspension dans la couche du fond, favoriserait un dépôt plus rapide de ces dernières lorsque la turbulence faiblit car elles seraient plus près du fond. A la pleine mer, la turbulence diminue provoquant donc un dépôt des particules en suspension par décantation différentielle et augmentant par la même occasion la taille des flocs. Au jusant, lorsque la turbulence augmente à nouveau, les particules déposées (plus grosses) sont remises en suspension, expliquant donc l'accroissement de la taille des particules. La turbulence dans la colonne diminue à nouveau pendant la basse mer, accentuant ainsi l'accroissement de la taille des particules par décantation différentielle et accélérant leurs dépôts.

La variation de la taille des particules pendant la saison sèche est donc contrôlée par les processus de ré-suspension au flot et au jusant et de décantation différentielle lors des étales.

Pendant la saison des pluies, la faible variation de la CVR des microflocs grossiers par rapport à celle des microflocs fins indique que les microflocs grossiers résisteraient plus au cisaillement turbulent. Le taux de cisaillement turbulent étant en moyenne supérieur au seuil de ré-suspension ($G \sim 1,5 \text{ s}^{-1}$) sur le cycle de la marée, la taille des agrégats remise en suspension pendant le jusant deviendrait large en présence d'une forte turbulence et de SSC élevée (Dyer & Manning 1999). Or, lorsque le niveau de la turbulence est très fort ($\lambda_k < 135 \mu\text{m}$), les plus grosses particules se cassent en de particules plus petites. Ceci expliquerait donc la diminution de la CVR des macroflocs et l'augmentation de la CVR des microflocs fins observées pendant le jusant et à mi-flot. De la basse mer jusqu'au début du flot et à la pleine mer, l'augmentation de la CVR des macroflocs et diminution de la CVR des microflocs, s'expliquerait par le fait que la turbulence ayant légèrement diminuée ($\lambda_k > 135 \mu\text{m}$) pendant ces périodes dans la colonne, favorisant la floculation des microflocs en particules plus grosses (macroflocs).

La variation de la taille et CVR des particules est donc contrôlée par la turbulence pendant la saison humide.

Les résultats obtenus pour l'estuaire de Cua Luc montrent un fonctionnement hydro-sédimentaire comparable à celui obtenu par Lefebvre et al. (2012) pour l'estuaire de Cam (peu distant et même bassin versant) au Vietnam. Toutefois les tailles des flocs sont trois fois plus petites dans l'estuaire de Cua Luc que dans l'estuaire de Cam.

5 CONCLUSION

La distribution des tailles des floccs a été classée en quatre modes pour les deux campagnes. L'algorithme utilisé pour décomposer la distribution des tailles tolère une légère variation de la taille des particules des modes mais seule leur concentration volumique relative (CVR) varie sous l'influence de la turbulence. Les tailles des particules sont plus larges en saison sèche qu'en saison humide.

Pour un taux de cisaillement turbulent supérieur au seuil ($G > 1,5 \text{ s}^{-1}$), on observe une augmentation de la SSC dans les compartiments pour les deux campagnes. Pour une énergie cinétique turbulente inférieure à $135 \mu\text{m}$, une rupture importante des macrofloccs se produit.

Aucun effet de la salinité sur la variation de la CVR des particules n'a été mis en évidence pour les deux campagnes. La turbulence semble être le facteur prépondérant dans la variation de la CVR des particules.

Pendant la saison humide, la turbulence est le facteur qui contrôle le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire. Au contraire, pendant la saison sèche le fonctionnement hydro-sédimentaire résulte de l'équilibre entre les processus de ré-suspension et de décantation différentielle.

Ces résultats montrent que le fonctionnement hydro-sédimentaire est le même pour les estuaires du Nord du Golfe de Tonkin au Vietnam malgré leurs différences caractéristiques (taille, forme, débit fluvial et flux sédimentaires).

5.1 Perspectives

Du fait de l'avarie matérielle, les données en saison des pluies sont insuffisantes pour obtenir une vision complète de la variabilité saisonnière du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Cua Luc. Idéalement, une campagne devrait être reconduite durant une saison des pluies.

Plusieurs améliorations du protocole de mesures peuvent être envisagées. Il est souhaitable de réaliser des campagnes en saison sèche et saison des pluies pour des marées de même coefficient, idéalement, deux campagnes à chaque saison, une en vive-eau, l'autre en morte-eau. Une autre amélioration consiste à exploiter les profils non seulement de descente mais également de remontée des appareils.

Pour approfondir la connaissance du fonctionnement hydrodynamique et hydro-sédimentaire de la baie, une analyse de la variation temporelle mais également spatiale de l'estuaire depuis l'embouchure jusqu'au point zéro (limite d'influence de la marée) est nécessaire.

Enfin, afin de caractériser les débits liquides et solides, des transects de courant doivent être effectué, tant transversalement que longitudinalement, afin d'estimer la variation locale en fonction de la bathymétrie. Ces mesures nous permettront également de quantifier les flux sédimentaires et les autres paramètres hydrodynamiques de l'estuaire ou du site.

Bibliographie

- Agrawal YC, Pottsmith HC (2000) Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. *Mar Geol* 168:89–114
- Braithwaite KM, Bowers DG, Nimmo Smith WAM, Graham GW (2012) Controls on floc growth in an energetic tidal channel. *J Geophys Res* 117, C02024
- Chu TV, Torréton J-P, Mari X, Nguyen HMT, Pham KT, Pham TT, Bouvier T, Bettarel Y, Pringault O, Bouvier C, Rochelle-Newall E (2014) Nutrient ratios and the complex structure of phytoplankton communities in a highly turbid estuary of Southeast Asia. *Environ Monit Assess* DOI 10.1007/s10661-014-4024-y
- Dyer KR, Manning AJ (1999) Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions. *J Sea Res* 41:87–95
- Fofonoff P, Millard RC Jr (1983) Algorithms for computation of fundamental properties of seawater, *Unesco Tech Paper Mar Sci*, 44, 53 pp.
- Ganju NK, Schoellhamer DH, Murrell MC, Gartner JW, Wright SA (2007) Constancy of the relation between floc size and density in San Francisco Bay. *Proc Mar Sci*, 8:75-91
- Geyer WR (1993) The importance of suppression of turbulence by stratification on the estuarine turbidity maximum. *Estuaries* 1, 16: 113—125
- Ho HH, Swennen R, Cappuyns V, Vassilieva E, Van Gerven T, Tran TV (2013) Speciation and mobility of selected trace metals (As, Cu, Mn, Pb and Zn) in sediment with depth in Cam River-mouth, Haiphong, Vietnam. *Aquat Geo chem* 19:57–75
- Hoitink AJF, Hoekstra P (2004) Observations of suspended sediment from ADCP and OBS measurements in a mud-dominated environment. *Coast Eng* 52:103–118
- Jarvis P, Jefferson B, Gregory J, Parsons SA (2005) A review of floc strength and breakage. *Water Res* 39(14):3121–3137
- Kumar RG, Strom KB, Keyvani A (2010) Floc properties and settling velocity of San Jacinto estuary mud under variable shear and salinity conditions. *Cont Shelf Res*, 30, 2067–2081
- Lefebvre J-P (2014) *Eléments d'hydrodynamique côtière physique des sédiments cohésifs*, Notes de cours Master 2 Océanographie Physique., Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin
- Lefebvre JP, Ouillon S, Vinh VD, Arfi R, Panché JY, Mari X, Thuoc CV, Torréton JP (2012) Seasonal variability of cohesive sediment aggregation in the Bach Dang–Cam Estuary, Haiphong (Vietnam). *Geo-Mar Lett* 32:103–121
- LISST-100X Particle Size Analyzer, User's Manual version 5.0

- Manning AJ (2004) The Observed effects of turbulence on estuarine flocculation. *J Coastal Res*, SI 41, 90-104. Ferrara (Italy), ISSN 0749-0208
- Manning AJ, Schoellhamer DH (2013) Factors controlling floc settling velocity along a longitudinal estuarine transect. *Mar Geol* 345:266–280
- Mari X, Torrétón J-P, Trinh CB-T, Chu VT, Lefebvre J-P, Ouillon S (2012) Seasonal aggregation dynamics along a salinity gradient in the Bach Dang Estuary, North Vietnam. *Estuar Coastal Shelf Sci*.
- Millero FJ, Chen CT, Bradshaw A, Schleicher K (1980) A new high pressure equation of state for seawater. *Deep Sea Res*, 1980, 27A:255-264
- Simpson JH, Brown J, Matthews J, Allen G (1990) Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries* 13(2):125–132
- Tsui P (2009) An expectation maximization algorithm for learning a multi-dimensional Gaussian mixture. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8636>
- Uncles RJ, Bale AJ, Stephens JA, Frickers PE, Harris C (2010) Observations of floc size in a muddy estuary. *Estuar Coastal Shelf Sci* 87:186–196
- van der Lee EM, Bowers DG, Kyte E (2009) Remote sensing of temporal and spatial patterns of suspended particle size in the Irish Sea in relation to the Kolmogorov micro scale. *Cont Shelf Res* 29:1213–1225
- van Leussen W (1997) The Kolmogorov micro scale as a limiting value for the floc sizes of suspended fine grained sediments in estuaries. *In* Burt N, Parker R, Watts J (eds) *Cohesive sediment*. Wiley, Hoboken, 45-62
- Winterwerp JC (2002) on the flocculation and settling velocity of estuarine mud. *Cont Shelf Res* 22:1339–1360

Annexes

Déroulement des campagnes

Dans le tableau ci-dessous sont regroupées la date et l'heure d'acquisition des profils pendant les campagnes BC1 et BC2. Les mesures ont débuté à midi pour se terminer à midi du jour suivant (c'est à dire un cycle de 24 heures). Les mesures de la campagne BC1 ont rencontré plusieurs problèmes à commencer par le retardement du premier profil, suivi de la coupure du câble, auquel sont accrochés les instruments, qui a perturbé le reste de la manipulation. Ensuite, une raison quelconque a empêché les mesures au huitième profil. Enfin tous ces problèmes n'ont pas permis d'aller à terme de la campagne BC1 c'est à dire faire des mesures jusqu'à midi du jour suivant. Par contre, tout s'est bien déroulé pour la campagne BC2.

| | BC 1 | BC 2 |
|--------|------------------|------------------|
| H02_01 | 20/10/2012 12:54 | 18/05/2013 12:09 |
| H02_02 | 20/10/2012 14:01 | 18/05/2013 14:00 |
| H02_03 | 20/10/2012 16:18 | 18/05/2013 15:59 |
| H02_04 | 20/10/2012 18:12 | 18/05/2013 18:00 |
| H02_05 | 20/10/2012 20:11 | 18/05/2013 20:09 |
| H02_06 | 20/10/2012 22:58 | 18/05/2013 21:59 |
| H02_07 | 21/10/2012 00:14 | 19/05/2013 00:01 |
| H02_08 | | 19/05/2013 01:57 |
| H02_09 | 21/10/2012 04:12 | 19/05/2013 04:04 |
| H02_10 | 21/10/2012 06:10 | 19/05/2013 06:01 |
| H02_11 | 21/10/2012 08:14 | 19/05/2013 08:04 |
| H02_12 | 21/10/2012 10:02 | 19/05/2013 09:57 |
| H02_13 | | 19/05/2013 10:41 |
| H02_14 | | 19/05/2013 11:39 |

Tableau A. Temps de réalisation des profils issus des CTD et LISST au cours des deux campagnes saison humide BC1 et saison sèche BC2.

La marée

Les données de marée utilisées proviennent de la station de Haiphong. Les marées sont diurnes dans cette zone. Ces profils en combinaison avec les profils de courant obtenus, ont permis de délimiter les durées du flots, de la Pleine Mer, du jusant et de la Basse Mer pour chaque campagne.

Le marnage pendant la saison humide est d'ordre deux fois celui de la saison sèche (respectivement 3,5 m et 1,8 m). Ceci avait permis de constater que la campagne BC1 s'est déroulée pendant une marée de vive-eau et BC2 pendant une marée de morte-eau.

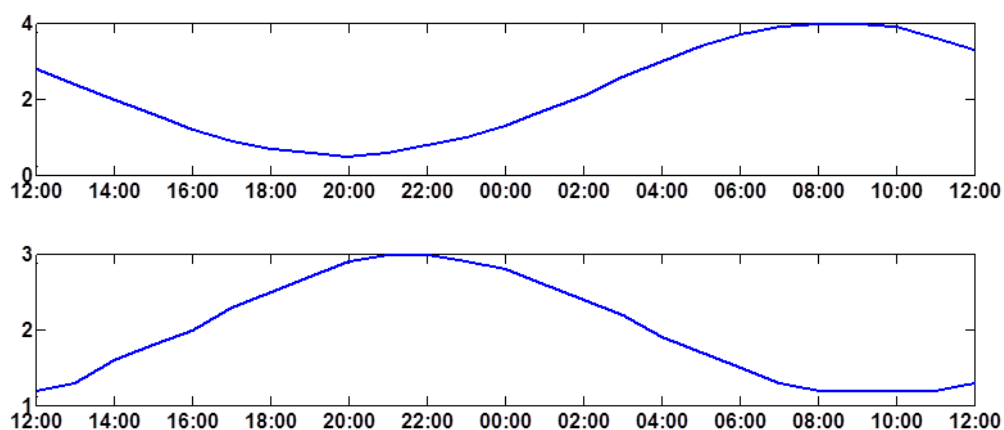
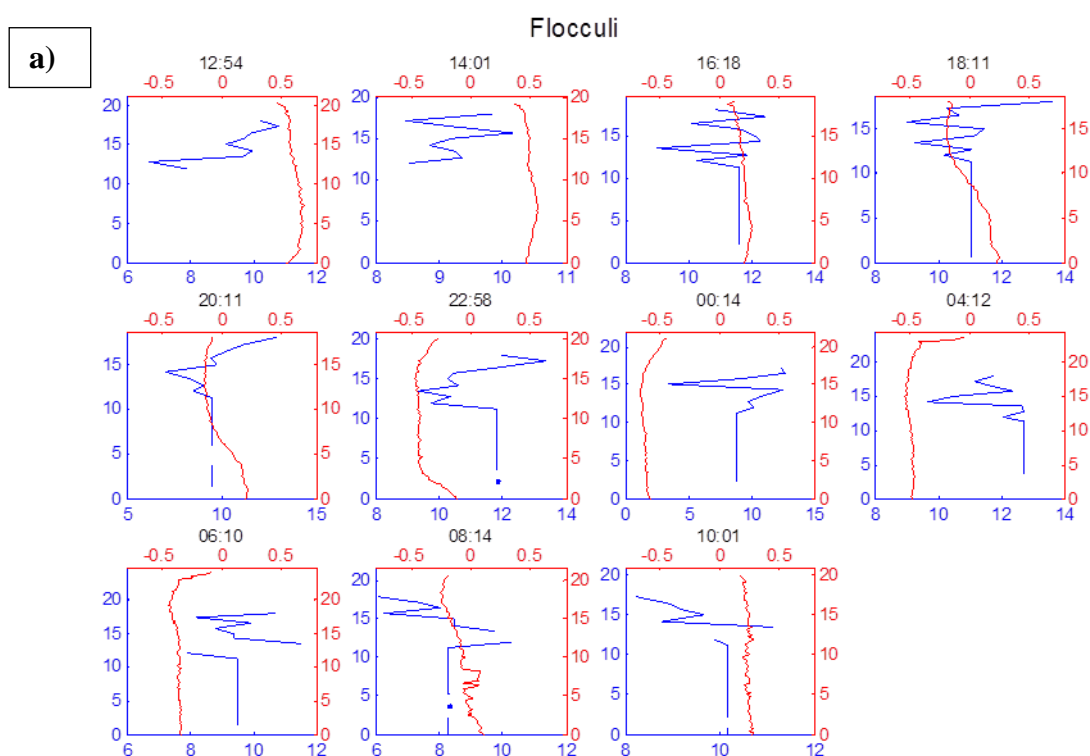


Figure A. Profil de la marée pendant les campagnes BC1 (haut) et BC2 (bas).

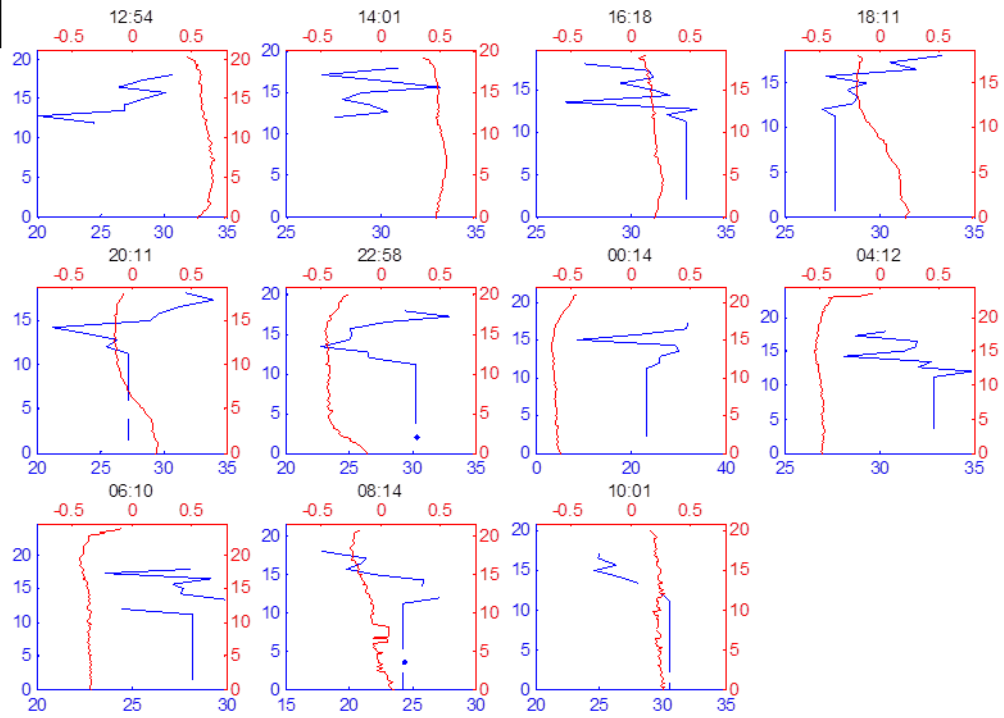
Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

Variation de la CVR de chaque mode en fonction de la profondeur sur le cycle de la marée



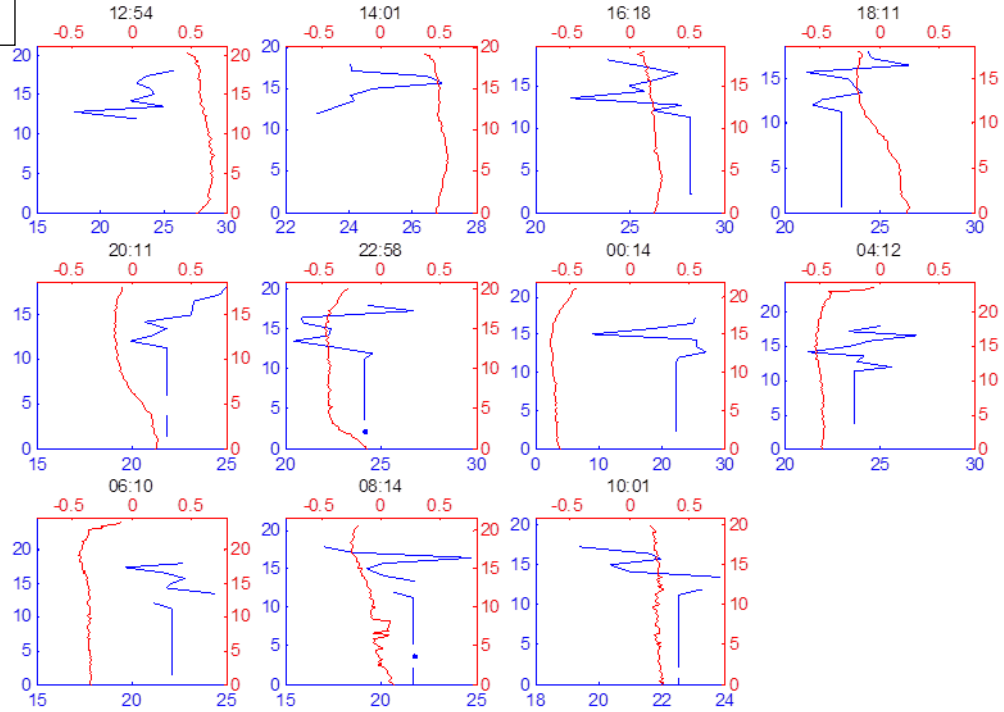
b)

Microflocs Fins



c)

Microflocs Grossiers



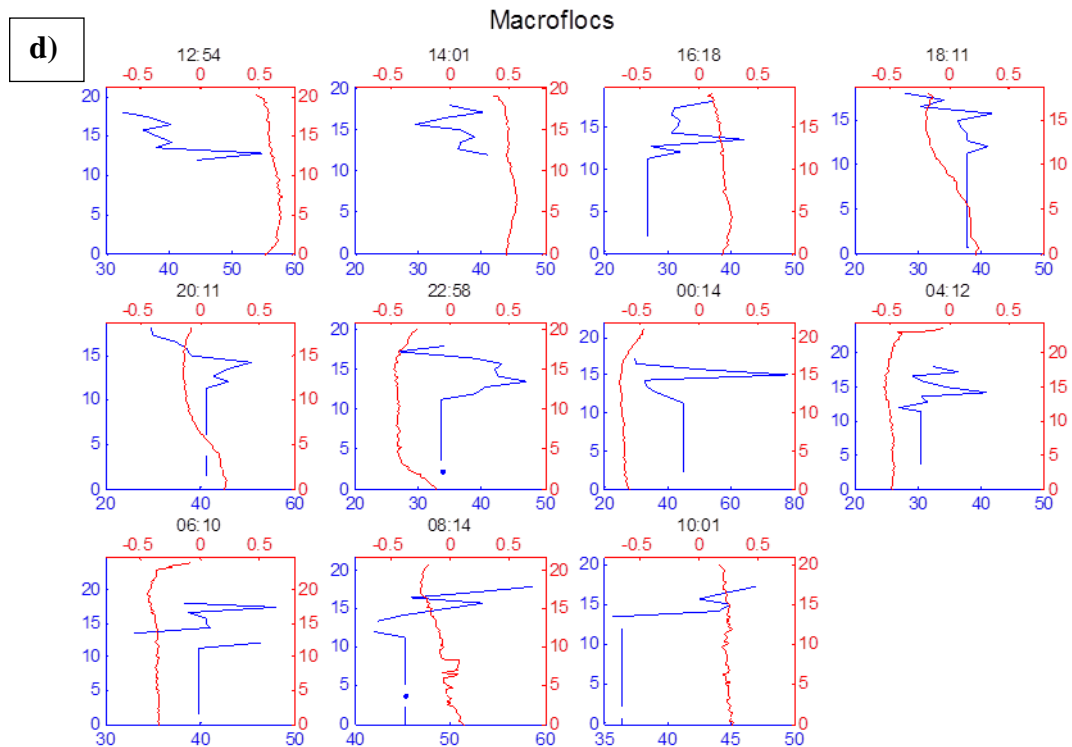
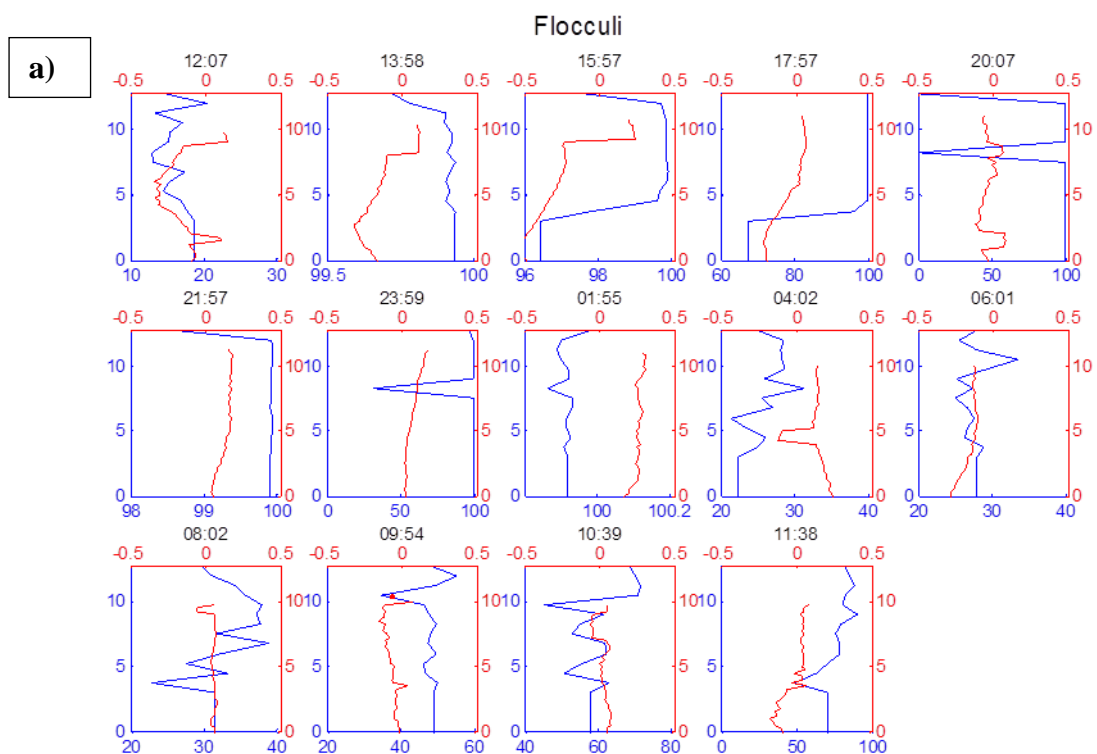
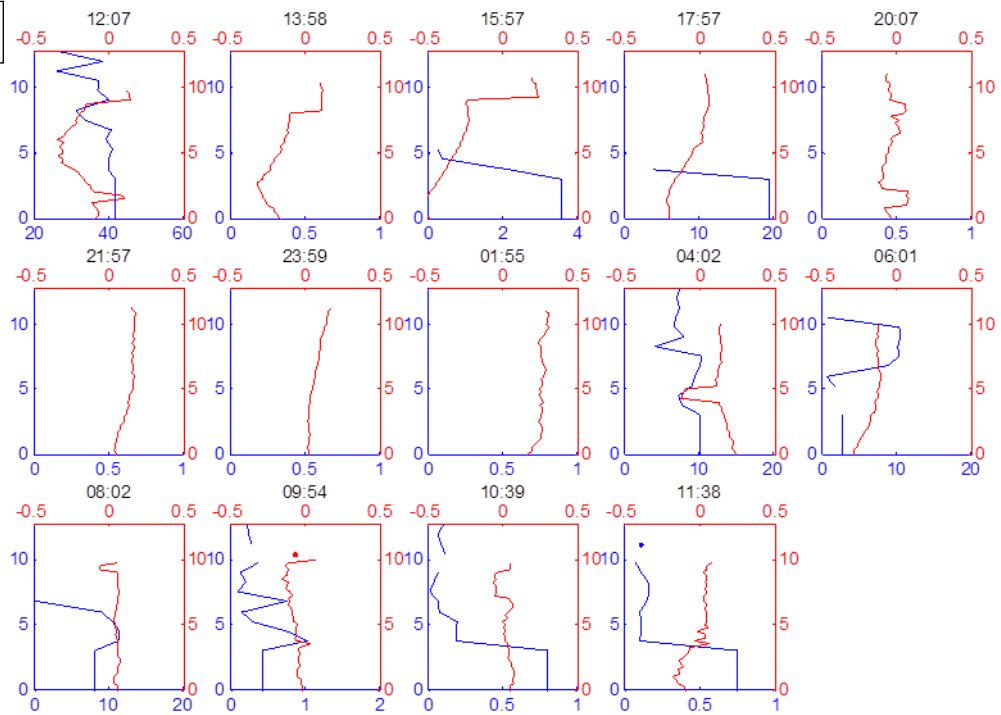


Figure B. Distribution de la concentration volumique sur la colonne (bleu (%)) a.) des flocculi, b.) des microflocs fins, c.) des microflocs grossiers et d.) des macroflocs de la campagne BC1 (saison humide) et de l'amplitude de l'écoulement (rouge (m/s)).



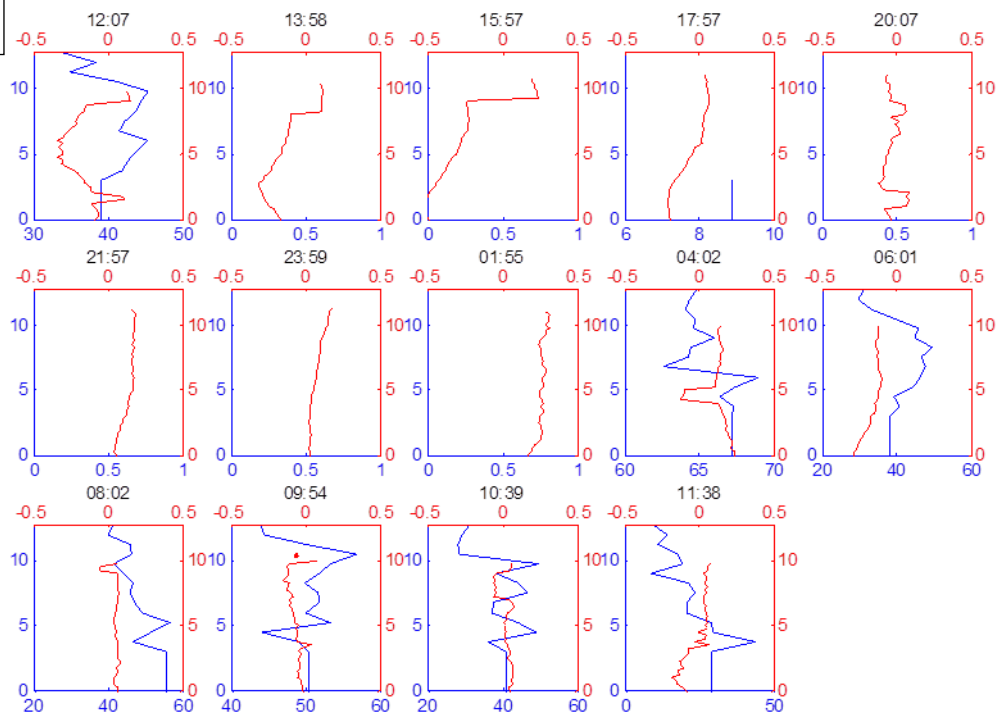
b)

Microflocs Fins



c)

Microflocs Grossiers



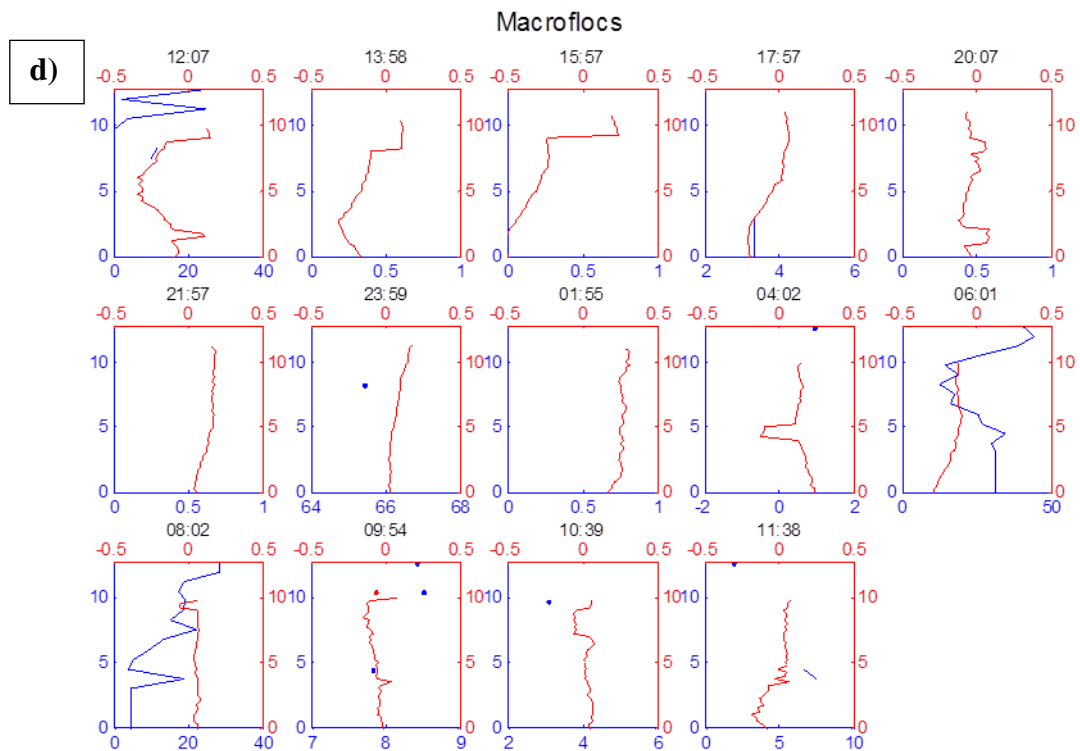
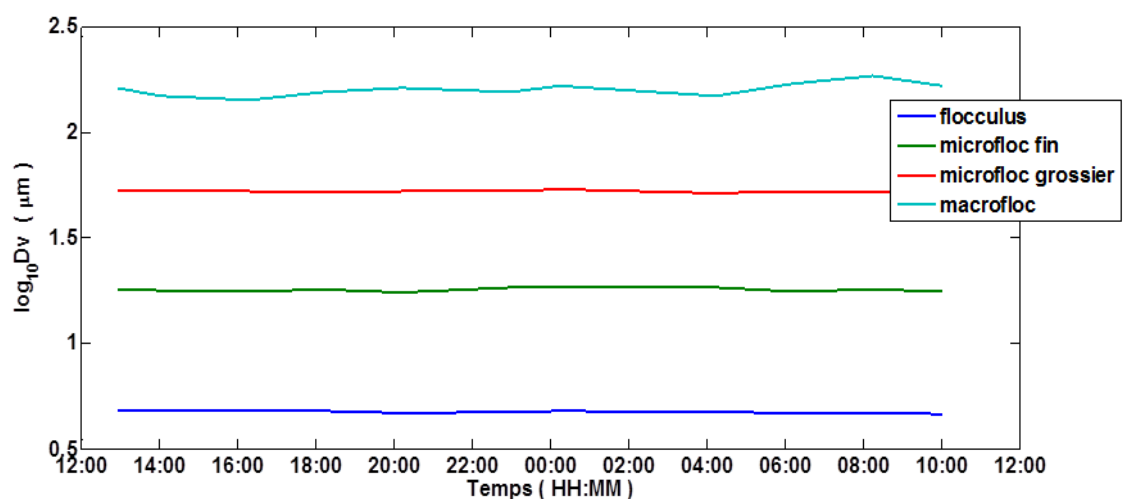


Figure C. Distribution de la concentration volumique sur la colonne (bleu (%)) a.) des flocculi, b.) des microflocs fins, c.) des microflocs grossiers et d.) des macroflocs de la campagne BC2 (saison sèche) et de l'amplitude de l'écoulement (rouge (m/s)).

Distribution de la taille des flocs sur le cycle de la marée



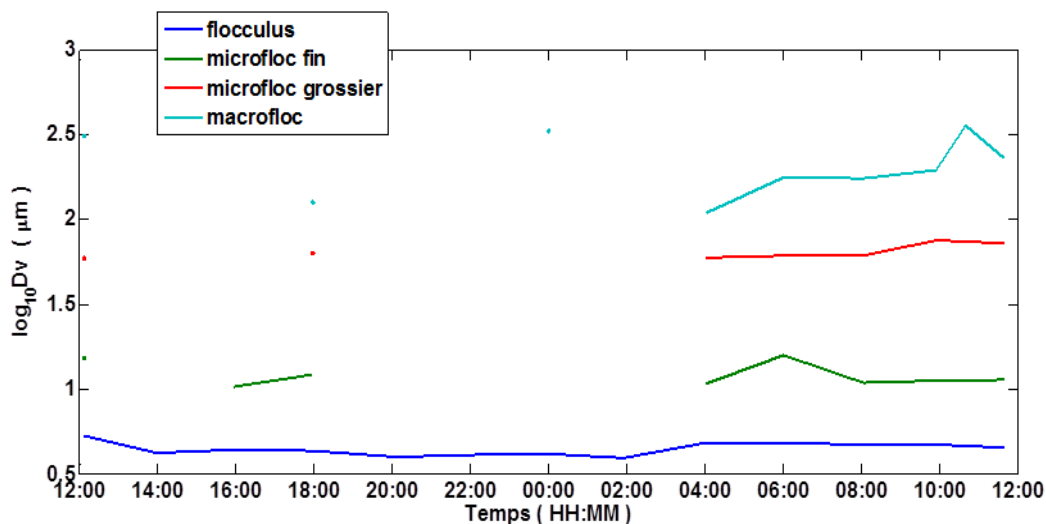


Figure D. Variation de la taille des particules pendant les campagnes BC1 (haut) et BC2 (bas).

Corrélations entre les différents modes des floes

| p | p (CVR(f) - CVR (mf)) | p (CVR(f) - CVR (mg)) | p (CVR(f) - CVR (ma)) | p (CVR (mf) - CVR (mg)) | p (CVR (mf) - CVR (ma)) | p (CVR (mg) - CVR (ma)) |
|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| BC 2 | -1* | -2* | NS | NS | NS | NS |

Tableau B. Significativité (p_value) de la corrélation entre la moyenne sur la colonne d'eau de CVR des 4 modes de floes. On a NS (non significative) si $p > 0.05$, 1* si $p < 0.05$ et 2* si $p < 0.01$. Le signe (+) indique si les deux paramètres augmentent ou diminuent ensemble et le signe (-) l'opposé.

Corrélations entre les tailles, la turbulence, la salinité et la SSC

| p | p ($D_v - \lambda_k$) | p ($D_v - \text{SSC}$) | p ($D_v - \text{Salinité}$) | p ($\text{SSC} - \lambda_k$) | p ($\text{SSC} - \text{Salinité}$) |
|------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| BC 2 | NS | NS | -2* | NS | +1* |

Tableau C. Significativité (p-value) de la corrélation entre la moyenne sur la colonne d'eau de D_v et la turbulence, la SSC, la salinité et aussi de la SSC et la turbulence, la salinité. On a NS (non significative) si $p > 0.05$, 1* si $p < 0.05$ et 2* si $p < 0.01$. Le signe (+) indique si les deux paramètres augmentent ou diminuent ensemble et le signe (-) l'opposé.

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1. Les différentes stations de mesures du projet Black Carbon | 5 |
| Figure 2. Station H02 dans la baie d'Halong (20.97°N , 107.06°E)..... | 6 |
| Figure 3. Décomposition des distributions de classes de taille en quatre modes : particule primaire ou flocculus, microfloc fin, microfloc grossier et macrofloc..... | 8 |
| Figure 4. Echantillonnage d'eau de mer avec une bouteille Niskin..... | 9 |
| Figure 5. Calibration de la turbidité en SSC : saison humide (rouge) et saison sèche (bleu)..... | 10 |
| Figure 6. Déploiement (gauche), principe de fonctionnement de l'ADCP et traitement de mesures (droite)..... | 11 |
| Figure 7. Concentration de sédiments en suspension durant le cycle de marée pendant la saison humide (haut) et pendant la saison sèche (bas)..... | 14 |
| Figure 8. Distribution de la salinité durant le cycle de marée pendant la saison humide (haut) et la saison sèche (bas)..... | 15 |
| Figure 9. Amplitude du courant ($m.s^{-1}$) avec direction aval-amont dans la colonne d'eau durant le cycle de la marée pendant la saison humide (haut) et la saison sèche (bas)..... | 16 |
| Figure 10. Distribution de Dv sur le cycle de la marée pendant la saison humide (haut) et la saison sèche (bas) | 18 |
| Figure 11. Variation de la CVR des flocs pendant la campagne BC1 (haut) et BC2 (bas).... | 20 |
| Figure 12. Niveau de la stratification haline de la colonne d'eau durant le cycle de la marée pendant la saison sèche..... | 21 |
| Figure 13. Corrélation linéaire entre la SSC et λ_k de la campagne BC2..... | 22 |
| Figure 14. Distribution de la concentration volumique des flocs en fonction du diamètre médian apparent et de la profondeur au jusant (20 oct. 2012 14 :00) et à pleine mer (21 oct. 2012 08 :14) de la saison humide..... | 23 |
| Figure 15. Distribution de la concentration volumique des flocs en fonction du diamètre médian apparent et de la profondeur au début du flot (18 mai 2013 13 :57) et à mi-jusant (19 mai 2013 04 :01) de la saison sèche. | 23 |
| Figure A. Profil de la marée pendant les campagnes BC1 (haut) et BC2 (bas). | 30 |
| Figure B. Variation de la taille des particules pendant les campagnes BC1 (haut) et BC2 (bas). | 32 |
| Figure C. Distribution de la concentration volumique sur la colonne (bleu (%)) a.) des flocculi, b.) des microflocs fins, c.) des microflocs grossiers et d.) des macroflocs de la campagne BC1 (saison humide) et de l'amplitude de l'écoulement (rouge (m/s)). | 34 |
| Figure A. Distribution de la concentration volumique sur la colonne (bleu (%)) a.) des flocculi, b.)des microflocs fins, c.) des microflocs grossiers et d.) des macroflocs de la campagne BC2 (saison sèche) et de l'amplitude de l'écoulement (rouge (m/s)). | 35 |

Listes des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Facteur de proportionnalité des deux campagnes, a pente de la droite, b ordonnées à l'origine et r^2 coefficient de détermination. | 10 |
| Tableau 2. Moyenne intégrée sur la colonne d'eau et moyennée sur le cycle de la marée de la concentration en sédiments en suspension pendant BC2. | 13 |
| Tableau 3. Salinité intégrée sur la colonne d'eau sur le cycle de la marée pendant les deux campagnes. | 14 |
| Tableau 4. Variation de la taille des particules pendant les deux campagnes BC1 et BC2.... | 17 |
| Tableau 5. Variation de la CVR des particules pendant les deux campagnes BC1 et BC2. ... | 19 |
| Tableau 6. Micro-échelle de Kolmogorov (μm) durant le cycle de la marée pour les deux campagnes. | 20 |
| Tableau 7. Paramètre de Simpson $\phi(J.m-3)$ moyennée sur le cycle de la marée pendant BC2..... | 21 |
| Tableau A. Temps de réalisation des profils issus des CTD et LISST au cours des deux campagnes saison humide BC1 et saison sèche BC2..... | 29 |
| Tableau B. Significativité (p-value) de la corrélation entre la moyenne sur la colonne d'eau de D_v et la turbulence, la SSC, la salinité et aussi de la SSC et la turbulence, la salinité. On a NS (non significative) si $p > 0.05$, 1* si $p < 0.05$ et 2* si $p < 0.01$. Le signe (+) indique si les deux paramètres augmentent ou diminuent ensemble et le signe (-) l'opposé. | 35 |
| Tableau C. Significativité (p-value) de la corrélation entre la moyenne sur la colonne d'eau de CVR des 4 modes de floes. On a NS (non significative) si $p > 0.05$, 1* si $p < 0.05$ et 2* si $p < 0.01$. Le signe (+) indique si les deux paramètres augmentent ou diminuent ensemble et le signe (-) l'opposé..... | 35 |