

Océanographie (Géologie marine)
Estimation de la matière en suspension à partir
de l'intensité rétrodiffusée des courantomètres
acoustiques à effet Doppler (ADCP)

Caroline Tessier^{a,*}, Pierre Le Hir^a, Xavier Lurton^b, Patrice Castaing^c

^a Ifremer, centre de Brest, Dyneco/Physed, B.P. 70, 29280 Plouzané, France

^b Ifremer, centre de Brest, TSI/AS, B.P. 70, 29280 Plouzané, France

^c EPOC, UMR 5805, université Bordeaux-I, avenue des facultés, 33405 Talence, France

Reçu le 13 avril 2007 ; accepté après révision le 22 octobre 2007

Présenté par Jean-François Minster

Résumé

À partir du signal rétrodiffusé des ADCP, une information « turbidité » est obtenue en calculant un indice de rétrodiffusion volumique, dont la dynamique est corrélée au forçage par la marée et la houle. Cet indice est calculé en corrigeant le signal reçu des pertes de transmission, et en prenant en compte les caractéristiques acoustiques propres à notre appareil, déterminées par calibration en bassin. Pour quantifier les matières en suspension (MES), une calibration empirique de cet indice a été faite à partir de mesures indépendantes, obtenues avec un turbidimètre optique. Les résultats montrent qu'une calibration à un seul niveau suffit pour obtenir des profils verticaux de concentration massique par acoustique. De plus, la période de mesure de calibration peut être réduite à deux jours, si la dynamique des MES est importante (vives-eaux et houles). *Pour citer cet article : C. Tessier et al., C. R. Geoscience 340 (2007).*

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Estimation of suspended sediment concentration from backscatter intensity of Acoustic Doppler Current Profiler. 'Turbidity' information can be obtained from the backscatter intensity of an ADCP, by computing a volume backscatter index, the dynamics of which is correlated to tide and wave forcing. This backscatter index is obtained from the ADCP signal, taking into account the transmission losses and the acoustical characteristics of our ADCP, calibrated in a test tank. In order to quantify the mass concentration, an empirical calibration of the backscatter index is obtained with independent measurements with an optical turbidimeter. The results show that in the present environment (with tide and waves) a one-level calibration is sufficient to obtain in-water profiles of mass concentration from the ADCP measurements. Moreover, the duration of calibration operations can be reduced to about two days, with the essential condition of measuring a sufficient dynamics of mass concentration, met under spring water conditions with waves. *To cite this article: C. Tessier et al., C. R. Geoscience 340 (2007).*

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : ADCP ; Rétrodiffusion ; Turbidité ; Concentration massique ; Marée ; Houles ; Zone côtière

Keywords : ADCP; Backscatter; Turbidity; Mass concentration; Tide; Waves; Coastal area

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : ctessier@ifremer.fr (C. Tessier).

1. Abridged English version

Introduction and methodology

This work aims at using the backscatter intensity of a 1200-kHz Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) in order to quantify the mass concentration profiles of suspended matter in a coastal area where fine sediment re-suspension is controlled by currents and waves (southern Brittany, France, Fig. 2).

The acoustical methodology is based on the Sonar equation expressed in decibels (Eq. (1)), quantifying every term of the energy balance. The source level NE varies with the available electrical power (Eq. (2)). The receiver's sensitivity is estimated from a laboratory calibration of the ADCP transducers, to convert received levels from counts (manufacturer-defined unit) to decibels (NR, Eq. (3)). Transmission losses (PT, Eq. (4)) are due to spherical divergence, water absorption ($\alpha_w R$) [4] and suspended sediment absorption ($\alpha_s R$). This last term is here neglected due to the low concentrations met ($< 120 \text{ mg l}^{-1}$). The backscattering strength IR is normalized to a 1-m^3 insonified volume and so provides a volume backscatter index IV (dB re. 1 m^3), which depends on the particles' concentration and the backscattering characteristics. This index can be related to the mass concentration M by using a model of backscattering cross-section σ and some hypotheses on particle size and density. However, the results of this method (Eq. (7)) were not satisfactory, due to uncertainties in the particles' nature. Thus, an empirical method has been applied to calibrate the backscatter index IV from independent mass concentration measurements (Eq. (8)).

Instrumental mooring (Fig. 1) consists of a bottom-mounted 1200-kHz ADCP (RDI *Workhorse*) and an optical turbidimeter (MICREL with a WETlabs LSS sensor) at 1.50 m above the bottom. The ADCP measures the current and the backscattered intensity every 10 min (within layers of 50 cm in the water column) and measures waves spectra every hour (from raw data acquired during 10 min at 2 Hz). Optical turbidity profiles (with both an Optical Backscatter Sensor OBS-3 and a transmissometer) were calibrated in mass concentration with water samples (Eqs. (9) and (10)), and were used to calibrate the moored turbidimeter (Eqs. (11) and (12)).

Results and discussion

In February 2005, the values of the backscatter index IV varied from -66 to -22 dB re. 1 m^3 , with downward gradient and tide dependence (Fig. 3). The source level

decrease was about 0.8 dB. From calculations, it appears that uncertainties due to hydrological (temperature and salinity) variations (about 1.15 dB) or to the transducer's sensitivity (about 2.5 dB) are small compared to the variability of the backscatter index, which gives here good acoustical-turbidity information in response to local forcing. However, a 3-dB error represents a factor of two for the mass concentration and this explains the difficulty to obtain good results from the direct inversion of the ADCP signal (Eq. (7)). Hence, an empirical calibration of IV was conducted with independent measurements, obtained here with the moored optical turbidimeter. The linear regression between IV and the logarithm of the mass concentration (Eq. (13)) gives a correlation coefficient around 0.97 (Fig. 4), whereas time series show a very good agreement between the two data sets (Fig. 5): a tide semi-diurnal variability was observed and concentrations reached 100 mg l^{-1} during days 41–44 (re-suspension by waves).

The robustness of relation (13) was tested over different time periods, depending on tide and wave conditions (Fig. 6). The aim was to optimize the time duration of measurements with the moored turbidimeter to avoid risks of trawling or bio-fouling. Calibration parameters (slope a , intercept b) and a root mean square error EQ (Eq. (14)) were computed for every defined period P0 to P6 (Table 1, Fig. 6). Results were better when considering spring tide period with waves (P2, P3, P4) than spring tide only (P1) or neap tide (P6), because the concentration dynamics was larger then. In this case, the calibration may be achieved over a small time period (less than 2 days) and resultant time series are then very satisfying (P2, Fig. 7).

The validity over the whole water column of this acoustic signal calibration was checked using vertical profiles of the OBS-3 (Fig. 8). Turbidity profiles are very similar and the dynamics of near-bottom turbid water layer is reproduced. During this spring tide period with long waves (P2), the mass concentration decreased from about 30 mg l^{-1} at 1.50 m above the bottom to less than 10 mg l^{-1} beyond 6–8 m above the bottom.

Thus, a one-point short-duration calibration data set seems to be enough to give a good estimate of mass concentration profiles over the whole water column during 10 days from the ADCP's backscatter index IV (Fig. 9). The only requirement is to have a sufficient range of concentrations. This remarkable intercalibration between optical and acoustical measurements was made possible by winter conditions with homogeneous population of particles coming from bed sediment. Fine sediment dynamics could then be studied in response to

local forcings of tide and waves. During wave events ($H_s \sim 2$ m), concentrations reached 25 mg l^{-1} about 5–6 m above the bottom and were about 15 mg l^{-1} up to mid-depth. At the end of the data set (neap tide without waves), mass concentrations were less than 10 mg l^{-1} in the bottom layer and less than 5 mg l^{-1} in the rest of the water column.

2. Introduction

L'objectif de ce travail est d'exploiter l'intensité rétrodiffusée d'un courantomètre profileur acoustique à effet Doppler (ADCP), afin de quantifier les matières en suspension dans une zone côtière, soumise aux courants de marée et aux houles. Le principe de mesure repose sur la dépendance de l'intensité acoustique reçue par l'appareil, à la quantité de réflecteurs que constituent les matières en suspension (MES). L'intérêt est multiple : il permet plusieurs niveaux de mesures dans la colonne d'eau et il est moins sensible aux bio-salissures que les systèmes optiques. De plus, la simultanéité des mesures du courant et des MES est susceptible de permettre l'estimation directe des flux particulaires.

L'utilisation d'appareils acoustiques pour l'étude des processus sédimentaires est reconnue pour les sédiments sableux, et pour de courtes échelles spatiotemporelles (période de la marée, dans les deux mètres au dessus du fond). Thorne et Hanes [13] ont fait une synthèse des méthodologies possibles applicables aux ABS (*Acoustic Backscatter System*). Sur des sédiments cohésifs, Hamilton et al. [6] et Shi et al. [9] ont utilisé un ASSM (*Acoustic Suspended Sediment Monitor*, possédant un transducteur vertical, à la fréquence de 500 kHz), dans des gammes de concentration élevée ($0,5\text{--}8 \text{ g l}^{-1}$). Plus récemment, Gartner [5] a exploité les signaux d'ADCP 1200 et 2400 kHz sur des périodes de temps plus grandes, toujours dans des gammes de concentrations élevées ($0,3\text{--}0,6 \text{ g l}^{-1}$). Les logiciels disponibles sur le marché sont VISEA-PDT (Aqua Vision BV), qui présente l'avantage de pouvoir fonctionner en temps réel, et *Sediview* (DRL), qui a été utilisé notamment par Ferré et al. [3] sur des données ADCP 300 kHz. Devant la confidentialité des algorithmes, nous avons fait le choix de développer notre propre méthode de calcul, afin d'identifier les processus majeurs intervenant dans la mesure acoustique de turbidité. De plus, les quelques données techniques disponibles sur les ADCP RDI [1] n'étant pas suffisantes, une calibration en bassin des appareils a permis de prendre en compte leurs caractéristiques individuelles.

3. Matériel et méthode

3.1. Méthodologie acoustique

L'ADCP émet une onde acoustique qui est atténuée au cours de sa propagation dans la colonne d'eau et qui est rétrodiffusée par les particules présentes. L'intensité du signal rétrodiffusé est enregistrée par l'appareil en unités arbitraires, sous forme d'un nombre de *counts*, *NC*. Pour relier cette grandeur à la charge en particules d'eau, il est nécessaire d'établir un bilan d'énergie entre l'émission et la réception, l'équation du sonar, souvent exprimée en décibels (dB re. $1 \mu\text{Pa}$, équivalent à $20 \log_{10}(p/p_0)$, avec p la pression acoustique considérée et $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ la pression de référence) [8] :

$$NR = NE - 2PT + IR \quad (1)$$

avec *NR* le niveau acoustique reçu, *NE* le niveau émis, *PT* les pertes de transmission, et *IR* l'indice de rétrodiffusion, lui-même lié à la concentration massique recherchée *M*.

Le niveau émis *NE* (dB re. $1 \mu\text{Pa}/1 \text{ m}$) est obtenu par calibration de l'ADCP en bassin. Il est évalué en se ramenant à la distance de référence de 1 m du transducteur et dépend de la tension des piles enregistrée par l'appareil en valeur hexadécimale (U_{ADC} en *counts*). La relation suivante est obtenue pour l'ADCP RDI 1200 kHz utilisé pour les mesures présentées par la suite :

$$NE = -1,149 \cdot 10^{-4} (U_{ADC})^2 + 0,0707 (U_{ADC}) + 207,47 \quad (2)$$

Le niveau reçu, mesuré en *counts* (*NC*) a été calibré en décibels (*NR*) avec la relation suivante, obtenue à partir de mesures en bassin :

$$NR = B + K_c (NC - NC_0) \quad (3)$$

avec $B = 70 \text{ dB re. } 1 \mu\text{Pa}$, $NC_0 = 46 \text{ counts}$ et $K_c = 0,423 \text{ dB/count}$, valeur proche de la valeur nominale, 0,45, proposée par RDI.

Les pertes de transmission *PT* sont liées à la divergence sphérique (décroissance en $1/R^2$ de l'intensité acoustique, *R* étant la distance au transducteur) et à l'amortissement par le milieu dissipatif (décroissance exponentielle de l'amplitude en distance). Elles sont évaluées en décibels selon :

$$PT = 20 \log_{10}(\psi R) + (\alpha_w + \alpha_s) R \quad (4)$$

avec α_w le coefficient d'atténuation liée à l'eau (selon le modèle de Francois et Garrison [4], $\alpha_w = 0,5316$ dB/m à 1200 kHz, 10 °C, 34 psu et 20 m de profondeur). Il a été vérifié qu'à la fréquence de 1200 kHz, le coefficient d'atténuation α_s , lié aux particules présentes dans la colonne d'eau, est négligeable pour la gamme de concentration mesurée pendant la période de mouillage ($M < 120$ mg/l). Dans le cas contraire, une méthode itérative est nécessaire pour calculer la concentration massique intervenant alors dans le terme d'indice de rétrodiffusion et dans le terme de perte par transmission.

Pour la perte par divergence sphérique, un facteur de correction ψ est appliqué dans le champ proche, où le champ de pression est oscillant. La formulation de Downing et al. [2] est utilisée :

$$\psi = \frac{1 + 1,35z + (2,5z)^{3,2}}{1,35z + (2,5z)^{3,2}} \quad (5)$$

où $z = R/R_0$, avec $R_0 = a_t^2/2\lambda$, a_t étant le rayon du transducteur et λ la longueur d'onde. Ici $R_0 = 1,08$ m.

L'indice de rétrodiffusion IR dépend de la densité numérique N des particules dans le volume insonifié V de la cellule considérée, et de σ , la section efficace de rétrodiffusion moyenne de ces particules. Il s'exprime selon :

$$IR = 10 \log_{10}(\sigma NV) \quad (6)$$

Le volume V croît avec la distance au transducteur. Les faisceaux des transducteurs pouvant être assimilés à des cônes, le volume insonifié de la i^{e} cellule, V_i , à la distance R_i du transducteur vaut $V_i = \pi(\phi/2)^2 R_i^2 L$ (m^3), avec $\phi = 0,99^\circ$ l'ouverture équivalente du faisceau et $L = D/2$ (m), D étant la hauteur de la cellule élémentaire de l'ADCP. Notons que la dimension L dépend de la configuration de l'ADCP. Du fait de la présence d'un filtre passe-bande à la réception, L est ici la dernière moitié de la cellule (RDI, commun. pers.).

La densité numérique N s'exprimant en fonction de la concentration massique M , la masse volumique ρ_s et le volume individuel des particules v_s ($N = M/\rho_s v_s$), il est finalement possible d'écrire, à partir des équations (1),(4) et (6) :

$$10 \log_{10}(M) = \underbrace{NR - NE}_{\text{signal}} + 40 \underbrace{\log_{10}(\psi R) + 2(\alpha_w + \alpha_s)R}_{\text{transmission}} - \underbrace{10 \log_{10}\left(\pi\left(\frac{\phi}{2}\right)^2 R^2 L\right)}_{\text{géométrie}} - \underbrace{10 \log_{10}\left(\frac{\sigma}{\rho_s v_s}\right)}_{\text{caractérisation des particules}} \quad (7)$$

Pour obtenir la concentration massique M , sans aucune calibration, il est nécessaire de connaître ou de faire des hypothèses sur la dimension et la nature des particules. La section efficace de rétrodiffusion σ dépend aussi de ces caractéristiques, par rapport à celles de l'onde acoustique utilisée. Elle peut être modélisée pour différents types de particules, en fonction du rapport entre la taille des particules et la longueur d'onde du signal ADCP (Stanton [10], Thorne et al. [14]). Nous avons donc construit un modèle de ce type et tenté de caractériser les particules présentes, afin de quantifier les paramètres σ , ρ_s et v_s . Cependant, les concentrations massiques obtenues de cette façon ne sont pas du bon ordre de grandeur, indiquant une incertitude trop forte sur la variabilité des particules et imposant la nécessité d'une calibration dans le traitement. Nous sommes donc revenus à une information « turbidité », obtenue par le calcul de l'indice de rétrodiffusion volumique IV (dB re. $1 m^3$), en calculant l'indice de rétrodiffusion pour un volume unitaire de $1 m^3$, avec l'hypothèse selon laquelle le contenu de chaque cellule est homogène :

$$IV = 10 \log_{10}\left(\frac{\sigma M}{\rho_s v_s}\right) = NR - NE + 40 \log_{10}(\psi R) + 2\alpha_w R - 10 \log_{10}\left(\pi\left(\frac{\phi}{2}\right)^2 R^2 L\right) \quad (8)$$

Pour quantifier les MES, nous avons alors cherché à établir une calibration empirique de IV avec des mesures indépendantes, ce qui a été fait dans notre cas avec celles d'un turbidimètre, lui-même calibré en concentration massique.

3.2. Instrumentation et site d'étude

Dans le but de valider la mesure de turbidité par ADCP, ont été mouillés côte à côte (Fig. 1) : un ADCP RDI *Workhorse* 1200 kHz, avec option WAVES, et un turbidimètre TBD MICREL, muni d'un capteur LSS (WETLabs, longueur d'onde 880 nm), ayant une gamme de mesure de 0 à 300 NTU. L'ADCP a été placé au fond de la mer, protégé par une cage anti-chalutage (Barnacle Oceanscience). Le turbidimètre a été maintenu à 1,50 m du fond par un petit flotteur, afin de réaliser une mesure toutes les 5 min, à la même cote du fond que la première cellule ADCP. L'ADCP a été configuré avec des cellules de résolution 50 cm, et a réalisé une mesure de courant toutes les 10 min et une

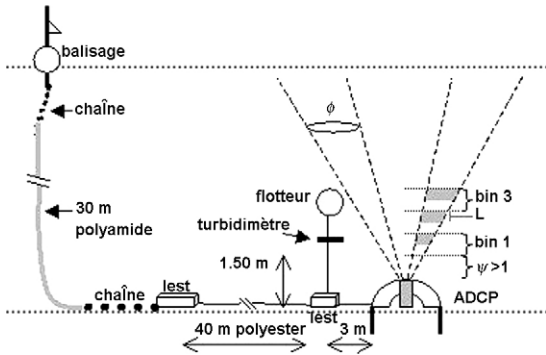


Fig. 1. Schéma du mouillage et géométrie de la mesure ADCP.

Fig. 1. Mooring and geometry of ADCP measurement.

mesure du spectre des vagues chaque heure, à partir de mesures à 2 Hz pendant 10 min.

De plus, des filtrations d'eau et pesées des MES (sur filtres Whatman GF/F 47 mm, de porosité moyenne 0,7 μm) ont été effectuées à proximité pendant 6 h, à partir de prélèvements d'eau effectués avec une bouteille Niskin à 2,50 m du fond et 1 m sous la surface. Des profils de transmissométrie (C-Star de WET-Labs, chemin optique de 10 cm, longueur d'onde 660 nm), et de rétrodiffusion optique (OBS-3 de D. & A. Instrument, longueur d'onde 875 nm) ont été acquis simultanément. Les pesées de MES ont permis de calibrer en concentration massique les profils de transmission et de turbidité, ces derniers étant eux-mêmes utilisés pour calibrer le turbidimètre optique TBD mouillé à 1,50 m du fond.

Le mouillage a été mis en place en Bretagne du Sud, à 1,5 milles nautiques à l'ouest de la pointe du Castelli, au sud-est de l'île Dumet (Fig. 2), du 5 au 18 février 2005 (jours 35 à 48), sur des fonds meubles vaseux. La

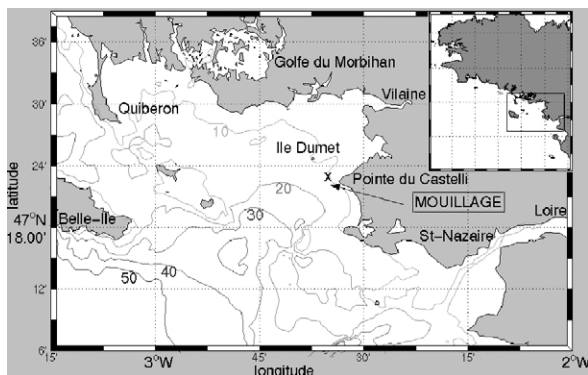


Fig. 2. Situation de la zone d'étude, position du mouillage.

Fig. 2. Location of the study area and of the mooring.

hauteur d'eau varie en ce point de 16 à 22 m selon la marée. Le passage entre l'île Dumet et la côte induit une intensification des courants de marée dans cette zone, avec des vitesses au fond pouvant dépasser 50 cm/s en vives-eaux. De plus, l'effet de cap concentre l'énergie des houles du large.

3.3. Calibration du transmissomètre et des turbidimètres optiques

Les calibrations en concentration massique du transmissomètre et de l'OBS-3 ont été faites avec les pesées de MES (gamme 0,7–35 mg/l) en subsurface et à 2,50 m du fond.

La calibration de l'OBS-3 donne la relation suivante (M_{OBS} en mg l^{-1} et X_{OBS} en mV) :

$$M_{\text{OBS}} = 0,06985 X_{\text{OBS}} \quad (R^2 = 0,964 \quad n = 27) \quad (9)$$

Pour le transmissomètre, l'atténuation à 660 nm (m^{-1}) a été calculée à partir du pourcentage de lumière reçue, la corrélation avec les MES donne la relation suivante (M_{trans} en mg l^{-1} et X_{trans} en m^{-1}) :

$$M_{\text{trans}} = 0,65764 X_{\text{trans}}^2 + 1,5344 X_{\text{trans}} \quad (R^2 = 0,977 \quad n = 27) \quad (10)$$

À partir des valeurs de concentration extraites des profils alors obtenus avec ces deux capteurs (gamme 8–40 mg l^{-1}), la calibration du TBD Micrel, positionné à 1,50 m du fond, donne les relations suivantes (M_{TBD} en mg l^{-1} et x_{TBD} en NTU) :

$$M_{\text{TBD1}} = 2,3816 x_{\text{TBD}} \quad (R^2 = 0,802, \quad n = 13) \quad (\text{avec l'OBS-3 calibré}), \quad (11)$$

$$M_{\text{TBD2}} = 2,7682 x_{\text{TBD}} \quad (R^2 = 0,741, \quad n = 13) \quad (\text{avec le transmissomètre calibré}). \quad (12)$$

La corrélation est meilleure avec l'OBS-3, sans doute parce que les mesures de l'OBS-3 et du TBD sont toutes deux basées sur la rétrodiffusion.

Les erreurs relatives sur les pesées de MES (volume filtré et pesée) sont faibles (estimées de 1 à 2,3 % sur la gamme 0,7–35 mg/l) ; l'incertitude sur les calibrations précédentes est surtout liée à l'échantillonnage (positionnement vertical et horizontal des mesures les unes par rapport aux autres) et à la spécificité des capteurs

(principe de transmission ou de rétrodiffusion), dont la sensibilité diffère en fonction des particules présentes dans le milieu. Cependant, les mesures réalisées ici à l'aide du transmissomètre et celles réalisées avec l'OBS-3 sont en général très proches [12] ; seuls quelques profils diffèrent légèrement près du fond, avec une légère sous-estimation des concentrations obtenues par transmission.

4. Résultats et discussion

4.1. Sensibilité de l'indice de rétrodiffusion volumique IV

L'indice de rétrodiffusion volumique IV est obtenu à partir du niveau NR reçu par l'ADCP, après correction des pertes de transmission et normalisation par unité de volume (Éq. (8)). Dans la colonne d'eau, il varie ici de -66 à -22 dB re. 1 m^3 (Fig. 3). Cette réponse acoustique fait clairement apparaître un gradient vertical de concentration, corrélé à la marée, elle-même mise en évidence par l'écho de la surface libre.

Le niveau émis par l'ADCP décroît de 216 à $215,2$ dB re. $1 \mu\text{Pa}/1 \text{ m}$. Le niveau reçu NR varie de 72 à 140 dB re. $1 \mu\text{Pa}$. Sur cette gamme de variation, l'erreur qui pourrait être faite sur l'estimation de K_c (valeur typique de $0,45$ au lieu de $0,423$ ici) est de $2,4$ dB. Compte tenu de la fréquence élevée de l'ADCP, les pertes de transmission atteignent 48 dB sur une hauteur d'eau de 20 m. Dans notre cas, un coefficient d'atténuation moyen α_w a été calculé pour toute la période, à partir des mesures de température au fond, enregistrées par l'ADCP (variant de $9,5$ à $10,5$ °C sur

toute la période) et une salinité moyenne de 34 psu. Les profils de température et salinité réalisés ponctuellement ont montré des variations, entre la surface et le fond, de 2 °C en température et de 4 psu en salinité. Les erreurs maximales induites sont estimées à $1,15$ dB, ce qui reste faible par rapport à la gamme de variation de IV . Dans nos conditions environnementales, l'indice de rétrodiffusion volumique apparaît donc ainsi être une bonne estimation par acoustique de la turbidité, répondant aux forçages locaux.

Cependant, étant donné qu'un écart de 3 dB sur cet indice équivaut à un facteur 2 sur la concentration, on comprend la difficulté d'obtenir un bon ordre de grandeur en concentration, par inversion directe du signal ADCP (7), d'autant plus que la méconnaissance de la variabilité spatio-temporelle de la distribution de taille des particules peut induire des biais importants. C'est pourquoi une calibration empirique de l'indice de rétrodiffusion a été préférée.

4.2. Corrélation ADCP/TBD

Nous avons donc cherché à calibrer l'indice de rétrodiffusion volumique en concentration massique, comme toute mesure classique de turbidité obtenue dans une unité différente (NTU, FTU, volts...). À partir des mesures du TBD placé à $1,50$ m du fond, une corrélation a pu être établie entre l'indice IV_1 mesuré dans la première cellule ADCP et le logarithme de la concentration massique $M_{\text{TBD}1}$ estimée avec le TBD (Fig. 4) :

$$10 \log_{10}(M_{\text{TBD}1}) = a \times IV_1 + b \quad (13)$$

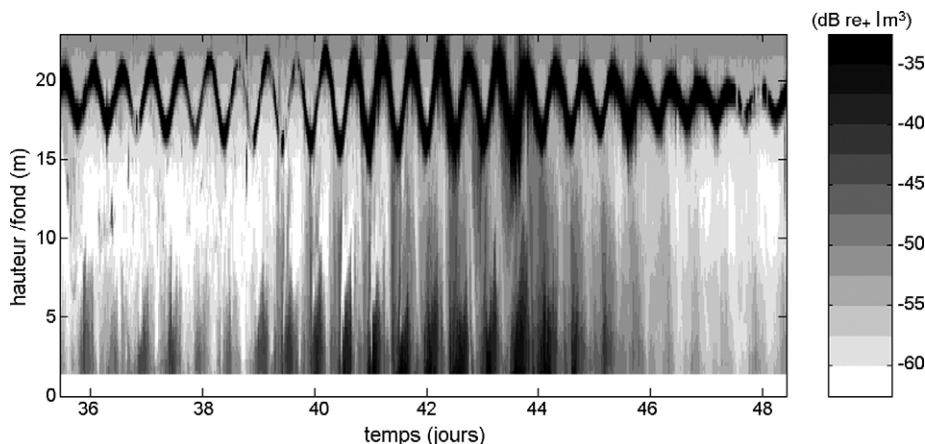


Fig. 3. Indice de rétrodiffusion volumique (dB re. 1 m^3), en fonction du temps (en jours depuis le 01/01/2005) et de la hauteur par rapport au fond (m).
Fig. 3. Evolution of the volume target strength (dB re. 1 m^3), with time in days (from 01/01/2005), and with height above the bottom (m).

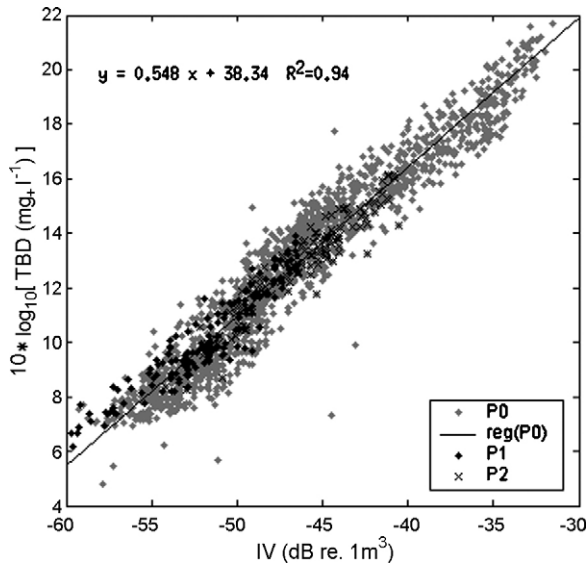


Fig. 4. Relation entre l'indice de rétrodiffusion volumique de la cellule 1 de l'ADCP et la concentration massique estimée par le turbidimètre TBD à 1,50 m du fond. Les points mesurés pendant la vive-eau sans houle sont en noir (P1) ; les croix indiquent les mesures pendant la période de vive-eau avec des houles longues (P2). La corrélation indiquée est faite sur la série complète P0 (points gris).

Fig. 4. Scatter plot of volume target strength of ADCP bin 1 and mass concentration estimated by the turbidimeter TBD at 1.50 m a.b. Black points: data recorded during spring water only (P1); crosses: measurements during spring water plus long waves (P2). The correlation is calculated over the whole time series P0 (grey points).

La détermination des coefficients par minimisation des écarts donne $a = 0,548$ et $b = 38,34$, avec un coefficient de corrélation de 0,97.

La série temporelle (Fig. 5) montre une très bonne adéquation entre les mesures de concentration obtenues

avec l'ADCP et avec le TBD. Une variabilité semi-diurne est visible et les concentrations dépassent 100 mg l^{-1} pendant la période des jours 41 à 44. L'ADCP montre une légère sous-estimation de quelques pics par rapport au TBD, avec des différences normalisées de $\sim 27 \%$ (jour 37) et $\sim 17 \%$ (jour 41). Ces écarts sont un peu plus faibles que ceux trouvés par Gartner [5] entre un ADCP et un OBS-3 (différences moyennes normalisées par rapport à la concentration moyenne de l'OBS-3 de 35,0 à 45,3 %), ainsi que ceux trouvés par Holdaway et al. [7] entre un ADCP et un transmissomètre (la moyenne des écarts types normalisés varie de 18 à 34 %, selon le site d'étude). Les mesures de ces deux auteurs montrent surtout des écarts importants lors des pics de plus fortes concentrations ($200\text{--}400 \text{ mg l}^{-1}$ au lieu de 100 mg l^{-1} ici), bien que l'atténuation supplémentaire induite soit prise en compte.

En théorie, la pente a de la relation (13) vaut 1, mais, dans la pratique, ce coefficient de calibration est ajusté. Gartner [5] trouve des pentes équivalentes de 0,40 à 1,15 avec un ADCP de 1200 kHz, dans des gammes de concentration plus élevées qu'ici ($260\text{--}500 \text{ mg l}^{-1}$). Il signale une variabilité temporelle et entre sites, indépendante de la fréquence de l'ADCP, soulignant ainsi la forte sensibilité du signal ADCP à la variabilité des tailles des particules et agrégats. Dans notre cas, la calibration est effectuée par l'intermédiaire du signal du turbidimètre optique TBD, et non directement avec les pesées MES. Le TBD et l'ADCP sont tous deux sensibles à la taille des particules a_s , mais, du fait de leurs longueurs d'onde très différentes (880 nm pour le TBD, et 1,2 mm pour l'ADCP), leurs sensibilités respectives sont en a_s^2 et a_s^6 . La très bonne corrélation observée entre les deux signaux (entre le signal en NTU et l'indice de

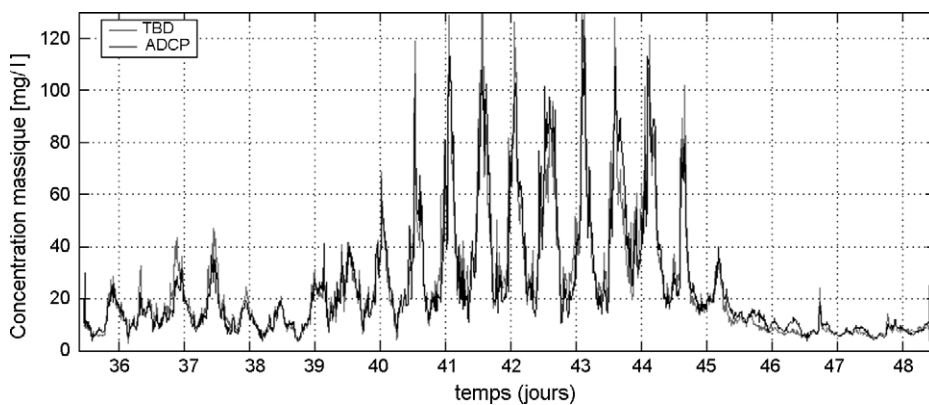


Fig. 5. Séries temporelles de la concentration massique (mg l^{-1}) à 1,50 m du fond, estimée par la mesure optique (TBD) (gris) et la mesure acoustique (ADCP) (noir).

Fig. 5. Time series of mass concentration (mg l^{-1}) at 1.50 m a.b., estimated from TBD optical measurement (grey) and from ADCP acoustical measurement (black).

rétrodiffusion) est donc remarquable et semble indiquer que le spectre de taille des particules est moins variable qu'attendu pendant ces 13 jours de mesures.

4.3. Robustesse de la relation $IV/10 \log_{10}(M)$ pour différentes périodes de mesures

La robustesse de la relation $IV/10 \log_{10}(M)$ (Éq. (13)) a été testée en évaluant la corrélation séparément pour différentes périodes de calibration. L'intérêt est d'estimer la période optimale et la durée minimale nécessaire du mouillage du turbidimètre optique, afin de limiter les risques de chalutage et de bio-salissures. L'hypothèse est faite que les concentrations restent suffisamment faibles ($< 200 \text{ mg l}^{-1}$ pour un ADCP 1200 kHz) pendant toute la période d'acquisition ; sinon, l'atténuation supplémentaire induite doit être prise en compte dans l'estimation de IV . Nous avons

donc calculé les coefficients de calibration, obtenus en considérant des périodes plus ou moins courtes de la série temporelle du TBD. La sélection des périodes a été faite en fonction des régimes de marée, vives-eaux (VE)/mortes-eaux (ME), et de houle.

Les paramètres de houles (hauteur significative et période du pic) sont calculés par le logiciel *WavesMon* [11] à partir des mesures ADCP de vitesses, pression et écho de la surface. La période de mesure couvre un cycle VE/ME (Fig. 6). Les houles sont de faible amplitude ($< 0,8 \text{ m}$) sauf pendant les jours 41–44, où elles atteignent 2 m à certains moments. Des houles longues ($T_{\text{pic}} > 15 \text{ s}$) de faible amplitude sont présentes au jour 39.

À partir de ces observations, plusieurs périodes P ont été choisies (Fig. 6), et une corrélation de type (13) a été établie pour chacune d'entre elles (Tableau 1). $P1$: VE sans houle, $P2$: VE avec houles longues de faible

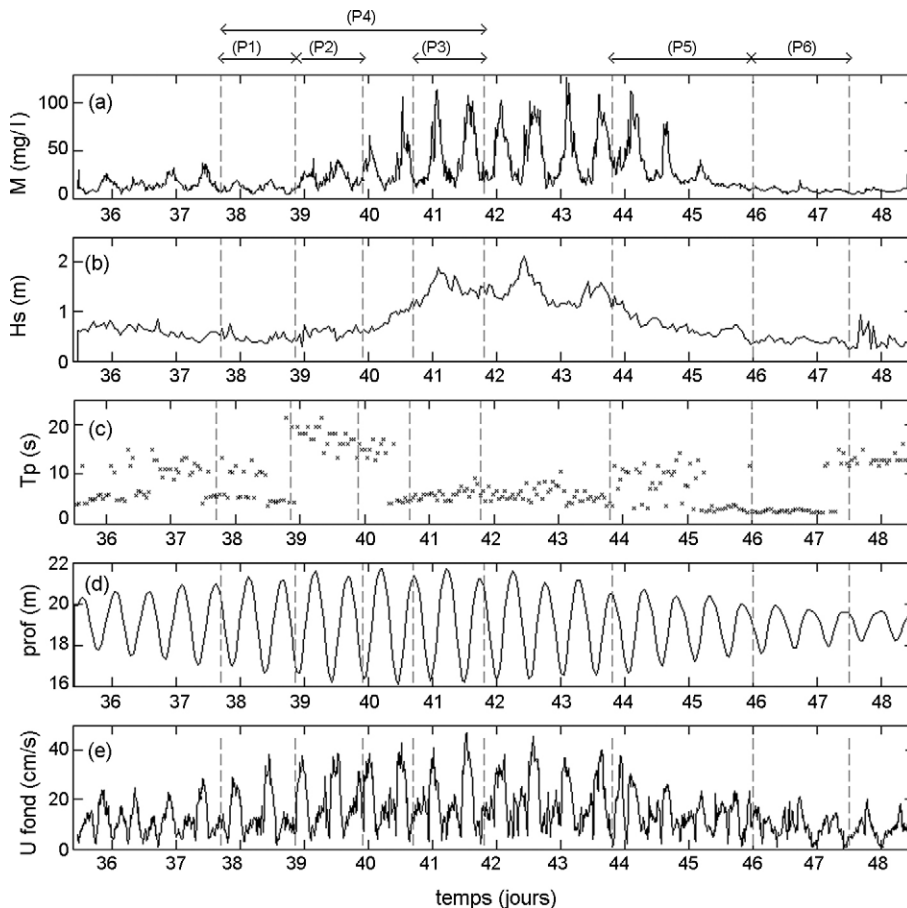


Fig. 6. Grandeurs physiques mesurées par l'ADCP 1200 kHz. (a) Concentration massique dans la cellule 1 ($F + 1,50 \text{ m}$) ; (b) hauteur significative de houle ; (c) période du pic ; (d) hauteur d'eau ; (e) intensité du courant horizontal dans la cellule 1 ($F + 1,25 \text{ m}$). Les périodes retenues pour les différentes calibrations sont délimitées par les traits verticaux.

Fig. 6. Physical parameters obtained with 1200 kHz ADCP. (a) Mass concentration in bin 1 ($F + 1.50 \text{ m}$) ; (b) significant height of the waves ; (c) peak period ; (d) water depth ; (e) horizontal current velocity in bin 1 ($F + 1.25 \text{ m}$). Selected calibration periods are delimited with vertical lines.

Tableau 1

Valeur des coefficients a et b de la relation $IV/10 \log_{10}(M)$ (13) pour différentes périodes de l'enregistrement ADCP (Fig. 6) [VE : marée de vive-eau ; ME : marée de morte-eau ; + h. : avec houles ; + h.l. : avec houles longues] et écart quadratique moyen EQ (%) (Éq. (14)), calculé sur l'ensemble de la série temporelle des concentrations massiques.

Table 1

Values of coefficients a and b in relation $IV/10 \log_{10}(M)$ (13), for different periods of the ADCP recording (Fig. 6) [VE: spring tide; ME: neap tide; + h.: with waves; + h.l.: with long waves] and root mean square error EQ (%) (14), calculated over the whole time series of mass concentrations.

Période	Conditions	a	b	EQ(%)
P0	Tout	0,548	38,34	17,60
P1	VE	0,491	35,55	21,93
P2	VE + h.l.	0,526	37,24	18,22
P3	VE + h.	0,476	35,73	18,98
P4	= P1 à P3	0,530	37,59	17,46
P5	ME + h.	0,615	41,00	20,34
P6	ME	0,3249	25,77	62,08

amplitude, P3 : VE avec houles courtes de 1,50–2,0 m, P4 : VE (périodes 1 à 3), P5 : ME avec houle, P6 : ME. De plus, l'erreur quadratique moyenne EQ (%) a été calculée, pour chacune des relations obtenues, sur les séries complètes de concentration massique du TBD (M_{TBD}) et de l'ADCP (M_{ADCP}) :

$$EQ = 100 \sqrt{\frac{\sum_{13j} (M_{ADCP} - M_{TBD})^2}{\sum_{13j} (M_{TBD})^2}} \quad (14)$$

Les résultats montrent que l'erreur quadratique moyenne est plus importante lorsque la calibration est faite en VE seule (P1, $EQ = 22$ %) par rapport aux

périodes de houle (P2, P3, P4, $EQ < 19$ %), où la dynamique des MES est plus importante. Sur la Fig. 4, les mesures faites au cours des périodes P1 et P2 sont mises en évidence par rapport à l'ensemble des points. Selon la période considérée, la relation calculée est plus ou moins écartée du nuage de points gris. De plus, la calibration en période de houles courtes de forte amplitude est un peu moins satisfaisante que celle en période de houles longues (P2), et cela du fait de l'absence de faibles turbidités en période très agitée. Cependant, les erreurs obtenues pour ces quatre périodes restent relativement faibles, et les séries temporelles de concentration massique obtenues sont très proches de celle du TBD (Fig. 7). En ME seule (P6), la dynamique étant vraiment faible, la pente déterminée est très inférieure à celle de référence (P0), et la série obtenue est incorrecte (Fig. 7).

L'essentiel est donc de tenter de cibler une période de validation où les contrastes de concentration seront élevés, bien que cela ne soit pas évident à prévoir. Dans notre environnement, les mesures en ME ne suffisent pas, celles en VE seule peuvent suffire, mais les mesures pendant les périodes de houles améliorent sensiblement les résultats. La période de mesures de calibration peut alors être réduite à un ou deux jours.

4.4. Validation sur les profils verticaux

La validité, sur la colonne d'eau, de la calibration de la mesure acoustique de turbidité a été vérifiée sur une quinzaine de profils verticaux de concentration massique, obtenus par l'ADCP et par l'OBS-3 [12]. Les structures observées par le capteur optique sont bien retrouvées avec la mesure ADCP. Une couche turbide

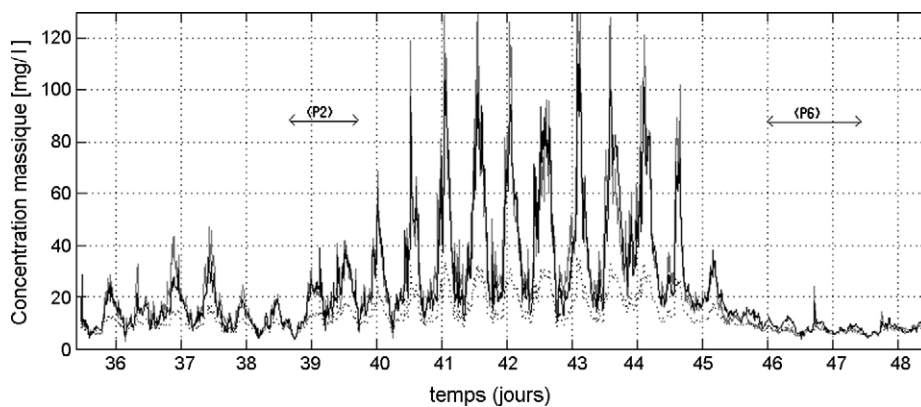


Fig. 7. Séries temporelles de la concentration massique (mg l^{-1}) à 1,50 m du fond, estimée avec le TBD (trait gris) et avec l'ADCP, calibré sur la période P2 (trait noir), et sur la période P6 (points noirs).

Fig. 7. Times series of mass concentration (mg l^{-1}) at 1.50 m a.b., estimated from TBD (grey line) and from ADCP, calibrated with the P2 period (black line) and the P6 period (black points).

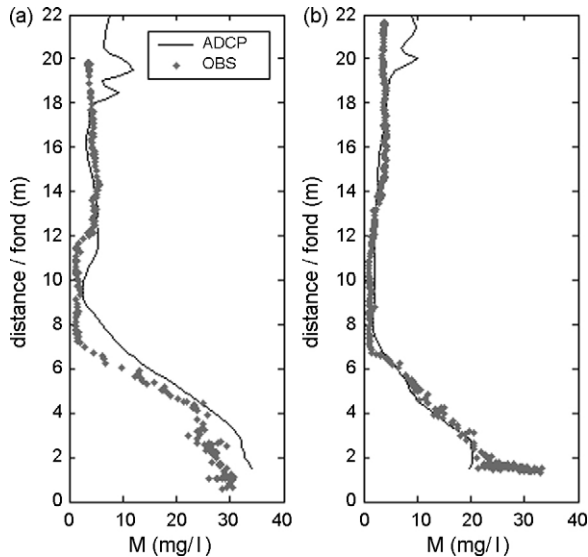


Fig. 8. Profils de concentration massique (mg l^{-1}), estimés avec la mesure ADCP (trait) et la mesure OBS-3 (points), au jour 39 : (a) mi-marée, (b) pleine mer.

Fig. 8. Profiles of mass concentration, estimated from ADCP (line) and from OBS-3 (points), at day 39: (a) half tide, (b) high tide.

de fond est observée, dont l'épaisseur et la structure varient en fonction de la marée. Au-dessus, les concentrations sont inférieures à 10 mg l^{-1} . À mi-marée (flot) (Fig. 8a), les profils sont un peu moins bien corrélés : les signaux vus par l'ADCP et par le transmissomètre sont sans doute différents, du fait de la distance séparant les deux profils et de la forte dynamique du signal à ce moment de la marée (le courant et la turbulence sont plus intenses, les profils de concentration sont plus variables temporellement et

spatialement). La concentration à 1,50 m du fond atteint les $30\text{--}35 \text{ mg l}^{-1}$. En pleine mer (Fig. 8b), le gradient de concentration est quasi linéaire entre 7 m et 1,50 m du fond, la concentration passant de 2 à 20 mg l^{-1} . Les profils de l'OBS-3 vont plus près du fond et montrent un gradient bien plus fort dans le dernier mètre, avec une concentration massique atteignant 30 mg l^{-1} . Ce jour-là, la mer était très calme, et des houles longues de très faible amplitude ont été observées à certains moments de la journée ; elles étaient imperceptibles lorsque les profils ont été réalisés, mais peuvent avoir eu une influence sur les signaux de turbidité.

Ces résultats montrent que la calibration du signal ADCP avec des mesures indépendantes à un seul niveau, fixe par rapport au fond, suffit à exploiter le signal ADCP sur toute la colonne d'eau. Notons que cela est possible aussi parce que, dans ces conditions hivernales, les particules présentes dans la colonne d'eau sont essentiellement minérales et probablement de nature homogène (la source étant le fond). Finalement, à partir de cette calibration (Éq. (13)), la concentration massique sur toute la colonne d'eau et pour toute la série temporelle peut se calculer en fonction de l'indice de rétrodiffusion IV (Fig. 9). De même qu'avec l'observation de IV , l'influence de la marée et des houles est ici visible. Pendant la période de houles de 2 m, les concentrations atteignent 25 mg l^{-1} vers 5–6 m du fond, et sont de l'ordre de 15 mg l^{-1} jusqu'à mi-profondeur. En fin de période (ME sans houle), les concentrations sont inférieures à 5 mg l^{-1} dans la colonne d'eau, et inférieures à 10 mg l^{-1} entre 1,5 et 3 m du fond. Une variabilité semi-diurne est observée, qui est corrélée aux périodes de flot de la marée, bien plus fort que le jusant au fond (Fig. 6), et

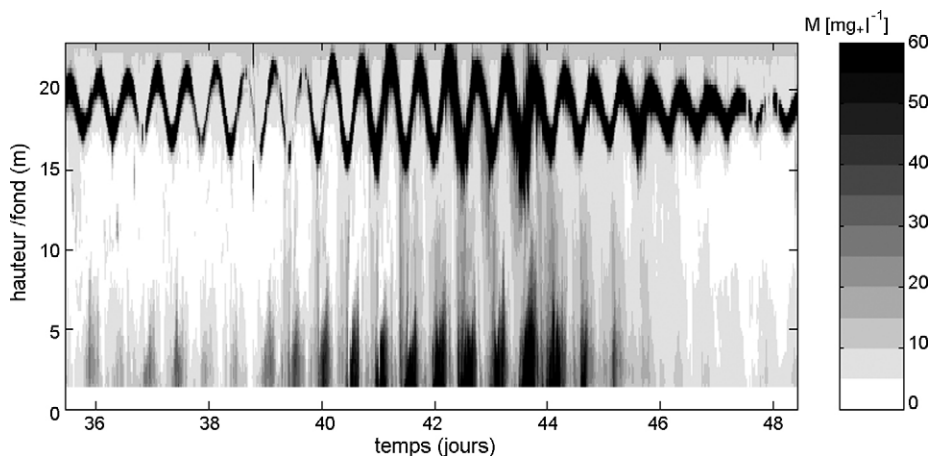


Fig. 9. Évolution temporelle de la concentration massique (mg l^{-1}), estimée par mesure acoustique (ADCP), sur toute la colonne d'eau.

Fig. 9. Time series of mass concentration (mg l^{-1}) in the water column, estimated from acoustical measurements (ADCP).

renforçant le forçage des houles. Le déphasage des pics de MES avec la VE pourrait être lié à l'inertie entre la remise en suspension et la sédimentation lente des particules fines, mais aussi à l'effet des houles sur l'état de compaction du sédiment. Il y a donc une interaction forte entre le forçage par la marée et celui des houles. La modélisation numérique permettra d'aller plus loin dans l'interprétation.

5. Conclusion

À partir de l'intensité rétrodiffusée des ADCP, un indice de rétrodiffusion volumique IV (dB re. 1 m^3) a été calculé, en corrigeant des pertes de transmission et en considérant les caractéristiques propres des transducteurs, ainsi que la baisse du niveau émis en fonction de l'énergie des piles. Cet indice permet une mesure acoustique de la turbidité, mettant en évidence l'effet de la marée et des houles dans notre zone d'étude. Pour quantifier cette turbidité en concentration massique, une calibration de IV a été obtenue avec des mesures indépendantes d'un turbidimètre optique, placé au niveau de la première cellule ADCP. Il a été montré que cette calibration est satisfaisante, même lorsqu'elle est faite sur une courte période, à condition que la dynamique des MES soit suffisante. Cette variabilité est observée en vive-eau et surtout pendant des périodes de houles, modulées par la marée. De plus, avec une calibration à un seul niveau, la relation est applicable sur toute la colonne d'eau et les profils verticaux de concentration massique obtenus alors ont été validés par comparaison avec des profils indépendants.

Remerciements

Merci à H. Jestin, et P. Bassoullet (IFR/DYNECO/PHYSED), ainsi qu'aux plongeurs Ifremer X. Caisey, J.-F. Bouget, C. Mingant et D. Clec'h, qui ont participé à la mise en place et la récupération du mouillage. Nous remercions D. Lucas pour sa participation au mouillage avec le *Kreiz Ar Mor* ainsi que l'équipage du *Gwen-Drez* pour le relevage. Merci à M. Legathe (Affaires maritimes de Piriac) pour son concours et à S. Breerette (IFR/STH/LBP) pour ses contacts auprès des profes-

sionnels de la pêche. Nous remercions aussi P. Cann (IFR/DYNECO/PHYSED) et J. Chauvin (IFR/LER La Trinité) pour les mesures effectuées à bord de la vedette Mesklec. Merci à M. Derrien et Y. Le Gall (IFR/TSI/AS) pour la calibration en bassin de l'ADCP.

Références

- [1] K.L. Deines, Backscatter estimation using broadband ADCP, RD Instruments Application Note FSA-008, 1999.
- [2] A. Downing, P.D. Thorne, C.E. Vincent, Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer, *J. Acoust. Soc. Am.* 97 (3) (1995) 1614–1620.
- [3] B. Ferré, K. Guizien, X. Durrieu de Madron, A. Palanques, J. Guillén, A. Grémare, Fine-grained sediment dynamics during a strong storm event in the inner-shelf of the Gulf of Lion (NW Mediterranean), *Cont. Shelf Res.* 25 (19–20) (2005) 2410–2427.
- [4] R.E. Francois, G.R. Garrison, Sound absorption based upon ocean measurement, part II, *J. Acoust. Soc. Am.* 72 (6) (1982) 1870–1890.
- [5] J.W. Gartner, Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California, *Mar. Geol.* 211 (2004) 169–187.
- [6] L.J. Hamilton, Z. Shi, S.Y. Zhang, Acoustic backscatter measurements of estuarine suspended cohesive sediment Concentration Profiles, *J. Coast. Res.* 14 (4) (1998) 1213–1224.
- [7] G.P. Holdaway, P.D. Thorne, D. Flatt, S.E. Jones, D. Prandle, Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration, *Cont. Shelf Res.* 19 (1999) 421–441.
- [8] X. Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics – Principles and Applications*, Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [9] Z. Shi, L.F. Ren, L.J. Hamilton, Acoustic profiling of fine suspension concentration in the Chnagjiang estuary, *Estuaries* 22 (3A) (1999) 648–656.
- [10] T.K. Stanton, Differences between sound scattering by weakly scattering spheres and finite-length cylinders with applications to sound scattering by zooplankton, *J. Acoust. Soc. Am.* 103 (1) (1998) 254–264.
- [11] B. Strong, *Workhorse ADCP Multi-Directional Wave Gauge Primer*, RDI, 2000.
- [12] C. Tessier, *Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière : l'exemple de la région marine Bretagne Sud*, thèse, université Bordeaux-1, 2006.
- [13] P.D. Thorne, D.M. Hanes, A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes, *Cont. Shelf Res.* 22 (2002) 603–632.
- [14] P.D. Thorne, P.J. Hardcastle, R.L. Soulsby, Analysis of acoustic measurements of suspended sediments, *J. Geophys. Res.* 98 (1993) 899–910 (C1).