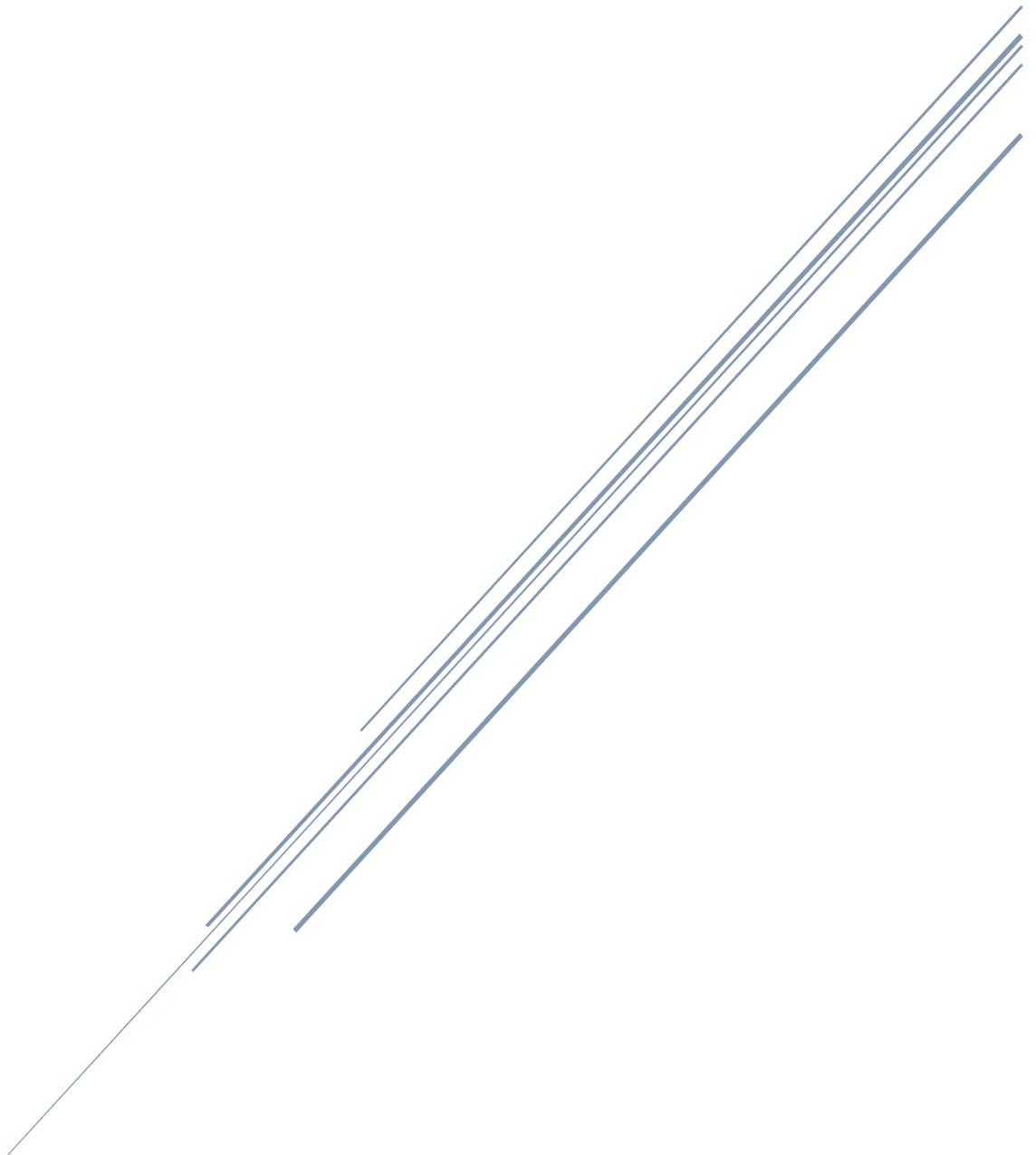


Projet CPIER PHRESQUES 2016-2018

Phase 1 – Renforcement spatiale des réseaux

Quantification et variabilité des concentrations en matières
en suspension en amont du barrage de Poses

Août 2018



*Flavie Druine, Julien Deloffre et Robert Lafite
Laboratoire M2C – Université de Rouen*

Table des matières

Liste des illustrations et des tableaux	3
Contexte et objectifs du projet	4
1. Instrumentation et acquisition de données <i>in situ</i>	6
1.1. Mesures haute-fréquence lors d'un évènement de crue	6
1.2. Protocole de mesures pour un suivi basse-fréquence	6
1.2.1. <i>Campagnes de mesures in situ</i>	6
1.2.2. <i>Stratégie d'acquisition</i>	7
2. Méthodologie d'étude	9
2.1. Quantification des concentrations en matières en suspension par les capteurs optiques ..	9
2.1.1. <i>Capteurs optique à rétrodiffusion</i>	9
2.1.2. <i>Quantification des concentrations massiques de MES</i>	10
2.1.3. <i>Relation Turbidité/MES : optimisation de la méthode de calibration</i>	11
2.1.4. <i>Estimation des incertitudes sur les concentrations estimées</i>	12
2.2. Quantification des concentrations en matières en suspension par les capteurs acoustiques	13
2.2.1. <i>Principe de l'ADCP : vitesses d'écoulement et intensité rétrodiffusée</i>	13
2.2.2. <i>Equation du sonar</i>	Erreur ! Signet non défini.
2.2.3. <i>Calibration empirique du signal acoustique</i>	14
2.2.4. <i>Validation de l'inversion du signal acoustique</i>	17
3. Résultats et discussion	19
3.1. Suivi en continu des concentrations en MES sur le site de Porte-Joie	19
3.2. Inter-comparaison des profils de concentrations en MES et de vitesses d'écoulement issus de l'inversion acoustique sur les différents sites d'études	21
3.2.1. <i>Traitement des données basse-fréquence ADCP</i>	21
3.2.2. <i>Vitesses d'écoulement sur la section transversale ciblée</i>	22
3.2.3. <i>Concentrations en MES sur la section transversale ciblée</i>	23
Conclusion	24
Références bibliographiques	25

Liste des illustrations et des tableaux

Figure 1 : Carte de localisation du site de Porte-Joie, en amont du barrage de Poses (<i>crédit photo : Google Earth</i>).	4
Figure 2 : Variation des hauteurs d'eau [cm] et du débit [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] à Vernon sur la période 2012-2018..	7
Figure 3 : (A) Illustration du bateau utilisé pour les mesures sur la section – (B) Photo de la cage équipée des instruments, CTD (OBS-3+) et LISST.....	8
Figure 4 : Aperçu des transects d'acquisition ADCP et des profils verticaux OBS/LISST/ prélèvements.	8
Figure 5 : Principe de mesure des capteurs optiques par rétrodiffusion [Pelletier, 2013].....	10
Figure 6 : Dispositif de filtration.....	11
Figure 7 : Relation de calibration entre le signal de turbidité [NTU] et les concentrations en MES [$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$] sur les sites de Poses, Porte-Joie et Vernon, avec l'estimation de l'erreur moyenne relative [MRE - %].....	12
Figure 8 : Schéma de la géométrie des mesures de vitesse de courant $U(i)$ et d'intensité du signal rétrodiffusé $NR(i)$ par les particules dans un volume d'eau donnée $Vol(i)$, réalisées par un ADCP RDI positionné en surface.....	14
Figure 9 : Calibration empirique du signal acoustique.....	16
Figure 10 : Données acquises sur le site de Porte-Joie en période de crue (débit supérieur à $2200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	20
Figure 11 : Trajectoires du bateau enregistrées par l'ADCP sur les campagnes réalisées à Poses, à Porte-joie et à Vernon, le 05 et 06/06/2018.....	21
Figure 12 : Répartition des vitesses de courant [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] mesurées par l'ADCP 1200kHz sur les sections transversales ciblées de Poses, Porte-Joie et Vernon	22
Figure 13 : Répartition des concentrations en MES [$\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$] mesurées par l'ADCP 1200kHz sur les sections transversales ciblées de Poses, Porte-Joie et Vernon.	23
Tableau 1 : Tableau récapitulatif des caractéristiques optiques des capteurs de turbidité employés.	10
Tableau 2 : Tableau de synthèse des calibrations empiriques (pente α et intersection β) entre l'indice IV et les concentrations MES_{OBS} avec leurs erreurs associées sur les sites de Poses, Porte-Joie et Vernon.....	18

Contexte et objectifs du projet

La compréhension des flux de Matières En Suspension (MES) depuis les territoires amont jusqu'à la mer est aujourd'hui un enjeu pour un développement harmonieux des territoires. Cette question est au cœur des problématiques scientifiques des Zones Ateliers à l'échelle nationale. Par conséquent, dans le cadre du Contrat de Plan Inter Etat Région (CPIER) Vallée de la Seine (2015-2020), le projet d'Harmonisation et de REnforcement du Suivi haute-fréquence de la QQualité de l'Eau de la vallée de Seine (PHRESQUES – <http://www.seine-aval.fr/projet/phresques/>) a pour objectif de mettre en place un dispositif de suivi en continu de la qualité de l'eau cohérent à l'échelle du continuum Seine par le regroupement des différents réseaux de mesures (CARBOSEINE à l'aval de la métropole parisienne, SYNAPSES au sein de l'estuaire et SMILE en baie de Seine). Or, la répartition spatiale des réseaux de mesures met en évidence l'absence d'un suivi de l'interface entre les masses d'eaux continentales et estuariennes. Les données à cette interface constituent un véritable chaînon manquant dans l'étude des processus continentaux et estuariens. L'installation d'une station de mesure à l'amont immédiat du barrage de Poses (Porte-Joie – Figure 1) permettra d'obtenir un continuum de mesure amont-aval et de comprendre l'influence à large échelle de l'agglomération parisienne sur l'écosystème Seine, et fournira les flux de matières entrant dans la zone estuarienne/sortant de la zone fluviale, indispensables pour caler les estimations produites à partir des modèles numériques.

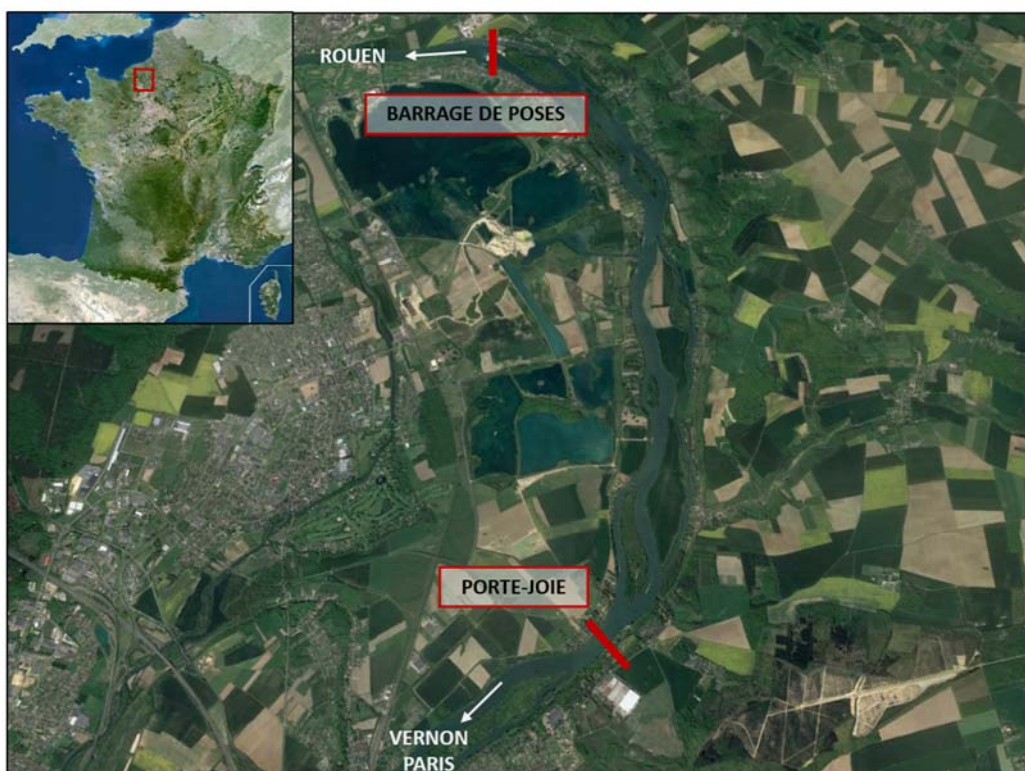


Figure 1 : Carte de localisation du site de Porte-Joie, en amont du barrage de Poses (crédit photo : Google Earth).

Plusieurs missions ont été réalisées et devront être poursuivies sur le site de Porte-Joie, situé en amont du barrage de Poses :

(i) L'achat d'un ADCP horizontal pour acquérir des mesures de courant/débit et de turbidité à partir du signal rétrodiffusé sur le futur site de Porte-Joie (réalisé)

(ii) La calibration de l'ADCP horizontal sur la section choisie à partir de campagnes *in situ* complémentaires (à réaliser)

(iii) La faisabilité des mesures de courant/débit et turbidité sur le long terme (commencé via un autre ADCP vertical et sonde de turbidité OBS3+), incluant une période de crue exceptionnelle (janvier 2018).

Après l'acquisition de l'ADCP horizontal, le retard pris au niveau de l'installation du ponton/station n'a pas permis son installation et sa calibration *in situ*. Néanmoins, quelques campagnes ont été réalisées dans le but de valider la représentativité des conditions environnementales sur le site choisi à l'aide d'autres instruments (ADCP vertical, sonde multiparamétrique avec un capteur OBS-3+ et d'un granulomètre laser *in situ* LISST 100X-C).

1. Instrumentation et acquisition de données *in situ*

1.1. Mesures haute-fréquence lors d'un évènement de crue

L'installation d'une sonde multiparamètre à proximité de la berge (STBD – sonde de turbidité, de pression et de température) sur le site de Porte-Joie a permis d'assurer un suivi haute fréquence de la variabilité des concentrations en MES en fonction du débit de la Seine, entre la période du 25/01/2018 au 06/07/2018, incluant une crue exceptionnelle (janvier 2018). Les données sont acquises toutes les minutes en sub-surface (1m). Un échantillonnage régulier est effectué dans le but de calibrer la sonde de turbidité de manière adéquate. Le capteur nécessite d'être vérifié et programmé fréquemment afin d'éviter l'encrassement et la dérive des mesures.

1.2. Protocole de mesures pour un suivi basse-fréquence

1.2.1. Campagnes de mesures *in situ*

En complément des mesures haute-fréquence, 3 campagnes d'acquisitions de données ont été réalisées sur la section transversale de la Seine au niveau du futur ponton de Porte-Joie entre novembre 2017 et juin 2018. L'objectif de ces campagnes est d'évaluer la variabilité spatiale des concentrations en MES et des vitesses d'écoulement sur la section ciblée. Afin de couvrir une large gamme de conditions hydrodynamiques, le planning des campagnes de mesure a été établi de manière à englober (i) un débit moyen (env. $527 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – Débit à Vernon – 30/11/2017), (ii) un débit de crue exceptionnelle (supérieur à $2200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – Débit à Vernon – 31/01/2018) et (iii) un débit moyen en descente de crue (env. $513 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – Débit à Vernon – 05 et 06/06/2018). La dernière campagne (05 et 06/06/2018) comprend également les sections transversales de la Seine sur les sites de Vernon et de Poses, dans le but d'une inter-comparaison des paramètres hydro-sédimentaires sur les différents sites de mesures. La figure 2 représente les variations de la hauteur d'eau [cm] et du débit moyen journalier [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] au cours de la période 2012-2018, en incluant les 3 campagnes de mesures *in situ* sur l'année hydrologique 2017-2018.

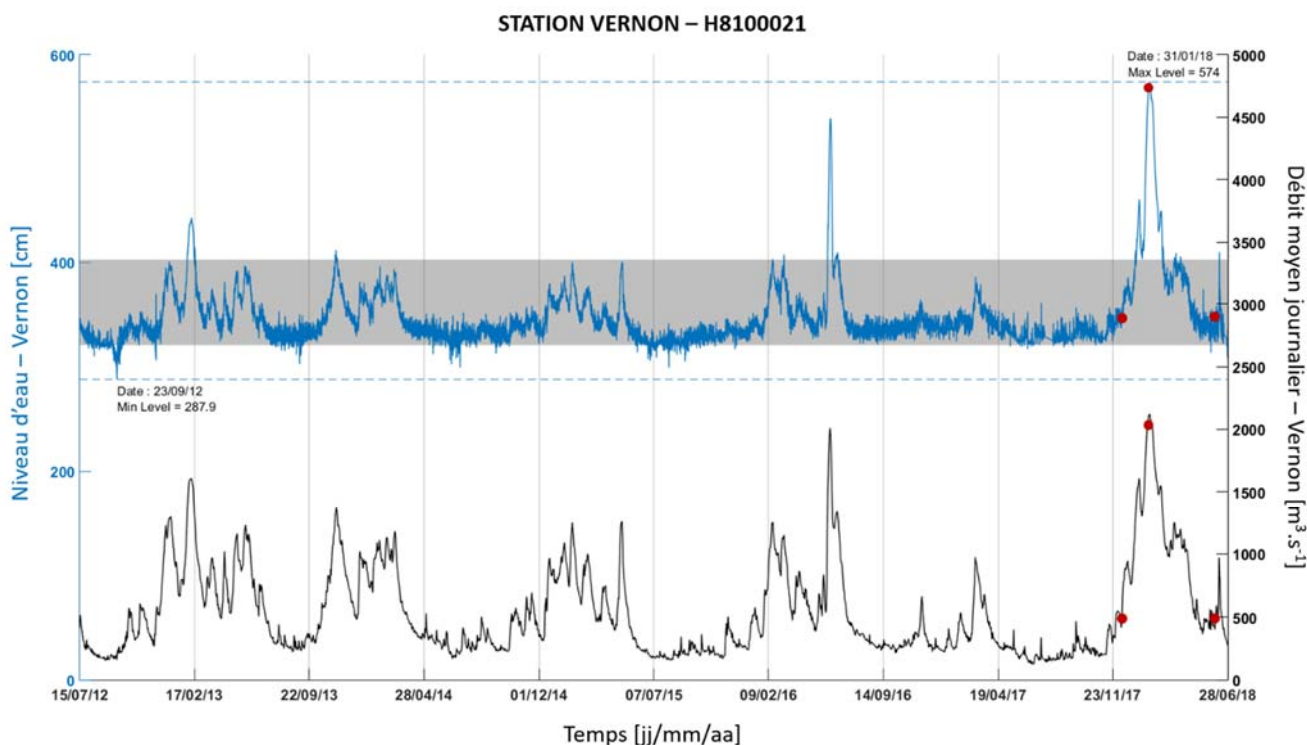


Figure 2 : Variation des hauteurs d'eau [cm] et du débit [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] à Vernon sur la période 2012-2018 - Positionnement des campagnes de mesures durant l'année hydrologique de 2017-2018. La bande grise représente le percentile à 95%, c'est-à-dire que 95% des hauteurs d'eau enregistrées se focalisent dans cet intervalle.

1.2.2. Stratégie d'acquisition

Afin de comprendre les hétérogénéités spatiales des concentrations en MES sur la section transversale ciblée, les vitesses d'écoulement [$\text{m}.\text{s}^{-1}$] et les intensités acoustiques rétrodiffusées [counts] ont été mesurées toutes les 5 minutes dans la colonne d'eau, d'une rive à l'autre, à l'aide d'un courantomètre profileur à effet Doppler, ADCP RDI Workhorse Sentinel 1200kHz. Ces mesures ont été programmées à une fréquence d'acquisition de 1Hz et une résolution verticale de 25 cm. Le déploiement de l'ADCP a été effectué à partir d'un bateau (Figure 3 – A et Figure 4 – A) couplé à un système de positionnement externe (D-GPS Hémisphère VS110). Ce type de déploiement sur un bateau permet une meilleure navigabilité d'une berge à l'autre et ainsi d'acquérir des données ADCP de meilleure qualité sur la section.

La calibration du signal acoustique nécessite un certain nombre de données complémentaires. Des profils verticaux ont été réalisés, toutes les heures, à l'aide d'une cage (Figure 3 – B) équipée d'une sonde de turbidité (OBS-3+ – fréquence 2Hz) et d'un granulomètre laser *in situ* (LISST 100X-C – fréquence à 1Hz), auxquels seront synchronisés des mesures ADCP ponctuelles. Ces profils sont couplés à des prélèvements d'eau en sub-surface (à environ 1m) et à 1m au-dessus du fond.

Afin d'étudier la variabilité des concentrations en MES et des vitesses d'écoulement à l'échelle de la section transversale ciblée, les profils verticaux ainsi que les prélèvements d'eau sont effectués en trois points de la section représentant la rive droite, la rive gauche et le centre du chenal (Figure 4 – B). Les profils de concentrations en MES estimés à partir de la calibration des sondes de turbidité (OBS-3+) vont permettre d'inverser le signal acoustique rétrodiffusé de l'ADCP par une calibration empirique ou théorique (cf. 2. Méthodologie d'étude) afin d'obtenir des concentrations en MES sur l'ensemble de la section.

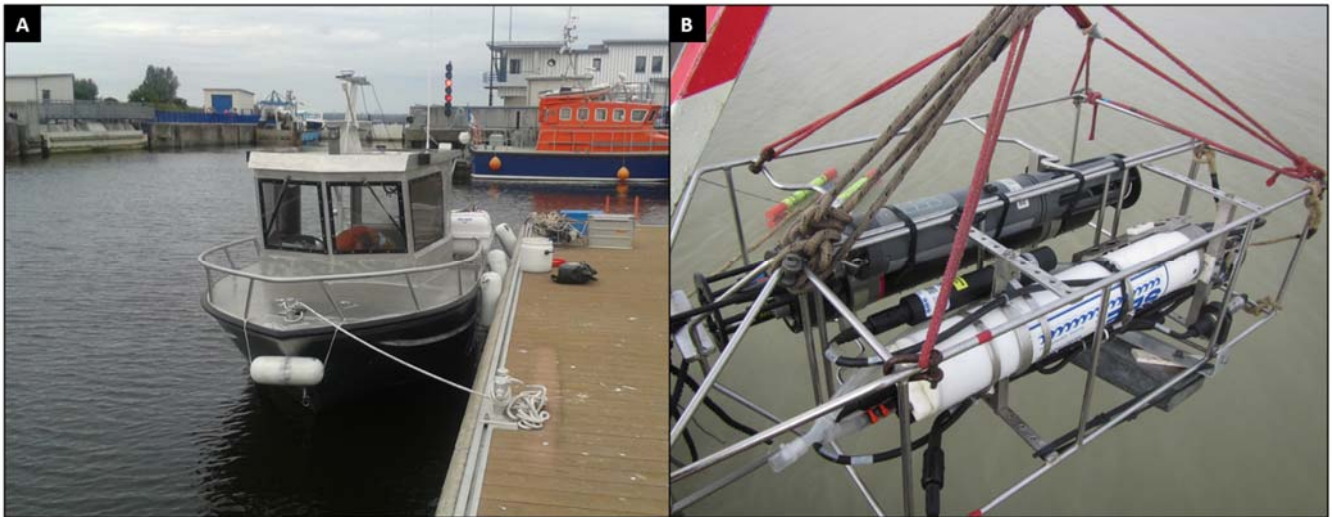


Figure 3 : (A) Illustration du bateau utilisé pour les mesures sur la section – (B) Photo de la cage équipée des instruments, CTD (OBS-3+) et LISST.

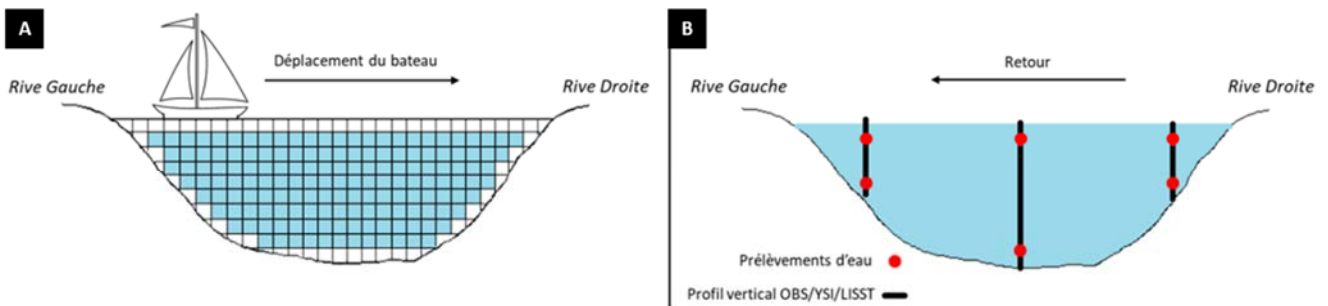


Figure 4 : Aperçu des transects d'acquisition ADCP et des profils verticaux OBS/LISST/prélèvements – (A) Schéma de la répartition des points de mesures de vitesse et d'intensité rétrodiffusée acquises par l'ADCP, les zones blanches correspondant aux zones aveugles par l'ADCP ; (B) Schéma de la répartition des profils verticaux et des prélèvements d'eau en trois points de la section transversale de l'estuaire (Rive droite/Centre du chenal/Rive Gauche).

2. Méthodologie d'étude

Les sections suivantes discuteront de la méthodologie de quantification des concentrations en MES sur la section transversale (i) à partir des capteurs optiques et (ii) à partir des capteurs acoustiques.

2.1. Quantification des concentrations en matières en suspension par les capteurs optiques

2.1.1. Capteurs optique à rétrodiffusion

Optical Backscatter Sensor (OBS-3+)

Connecté à la sonde Seabird 19plus V2 CTD, le capteur OBS-3+ utilise une technologie similaire à la néphélogétrie, seul l'angle entre la source de lumière incidente et le détecteur, compris entre 140° et 160°, est différent. Développé par D&A Instrument [Downing et al., 1981], le principe repose sur la rétrodiffusion optique pour mesurer la turbidité dans la colonne d'eau. Une lumière proche de l'infrarouge (850 nm ± 5 nm) émise par le capteur est dispersée ou réfléchiée par les MES présentes dans la colonne d'eau vers un détecteur de photodiodes placé à un angle entre 140° et 160° par rapport à l'onde incidente. La description détaillée de l'OBS-3+ est donnée dans le tableau 1 et la figure 5 d'après Downing et al. [1981].

Pour une mesure optimale, les capteurs OBS-3+ enregistrent la turbidité sur deux plages de mesure (*low range* et *high range*) afin d'augmenter la précision globale et la résolution des mesures acquises [Campbell Scientific INC., 2014]. La gamme de mesure réduite (*low range*) entre 0-1000 NTU permet ainsi d'être plus précis en présence de faibles valeurs de turbidité, tandis qu'une plage de mesure plus large (*high range*) permet de déployer le capteur OBS-3+ sur des zones où les valeurs de concentrations en MES supérieures à 1 g.L⁻¹ sont fréquemment dépassées. Dans notre cas, le capteur OBS-3+ enregistre toujours les deux plages, mais le choix a été fait de sélectionner la gamme basse à 0-1000 NTU les différents sites d'étude, à savoir Poses, Porte-Joie et Vernon.

Sonde multiparamètre (STBD)

Avec une technologie similaire à l'OBS-3+, l'enregistreur autonome NKE STBD permet de mesurer à la fois la turbidité [NTU – *Nephelometric Turbidity Unit*], la profondeur [m] et la température [°C]. Equipé d'un capteur Seapoint STM, la lumière émise par l'émetteur (proche infrarouge à 880 nm) est dispersée par les particules présentes dans la colonne d'eau (rétrodiffusion) [Marion,2010]. Un détecteur à photodiode détecte la lumière diffusée par les particules avec un angle compris entre 15

et 150° afin de la convertir en une valeur de turbidité. La quantité de lumière détectée est alors proportionnelle à la turbidité ou à la concentration en MES dans la colonne d'eau, sur une gamme comprise entre 0-1000 NTU. Le principe de fonctionnement et les caractéristiques de ce capteur sont présentés respectivement dans la figure 5 et le tableau 1.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des caractéristiques optiques des capteurs de turbidité employés.

Capteurs	OBS3+ (CTD)	NKE STBD
Méthode de mesure	Rétrodiffusion	Rétrodiffusion
Source de lumière	IRED	IR-LED
Longueur d'onde	850 nm	880 nm
Angle de détection	140 – 160°	15 – 150°
Unité de mesure	NTU	FNU/NTU
Longueur du rayon incident	≈ 50 cm (dans de l'eau distillée)	5 cm
Gamme	0 – 1000 NTU <u>et</u> 0 – 4000 NTU	0,01 – 1000 NTU
Précision	Vase : ± 2% Sable : ± 4%	± 2%
Résolution	0,001 NTU	0,007 NTU
Fréquence d'échantillonnage	0.5s	60s
Dispositif interne		

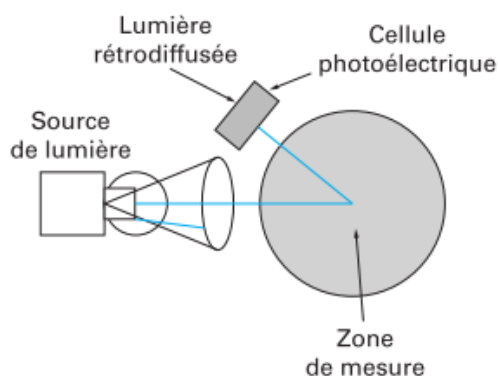


Figure 5 : Principe de mesure des capteurs optiques par rétrodiffusion [Pelletier, 2013]

2.1.2. Quantification des concentrations massiques de MES

Les échantillons d'eau sont filtrés sur des membranes en fibre de verre (Whatman™ GF/F) de diamètre de pore de 0,7 µm [NF EN 872, 2005]. En laboratoire, après homogénéisation de l'échantillon, un volume d'eau [V en L] est prélevé et filtré sur un filtre pré-pesé [poids sec M₀ en g]. Après filtration, les filtres sont rincés avec de l'eau distillée pour éliminer les sels, séchés (à 40°C pendant 48 heures) et pesés pour obtenir la concentration pondérale en MES (Figure 6).

A la sortie de l'étuve et avant d'être pesés à nouveau, les filtres sont conservés dans un dessiccateur entre 30 minutes et 1h afin de retrouver la température ambiante sans subir de réhydratation. La seconde pesée permet de déterminer la différence de masse entre le filtre initial et celui avec MES [poids M_1 en g]. Ce différentiel correspond à la masse de MES retenue sur le filtre et permet d'estimer une concentration massique en MES une fois rapportée au volume d'eau filtrée. La concentration en MES (C) s'exprime alors en $g.L^{-1}$ de la manière suivante :

$$C = (M_1 - M_0) / V \quad (1)$$

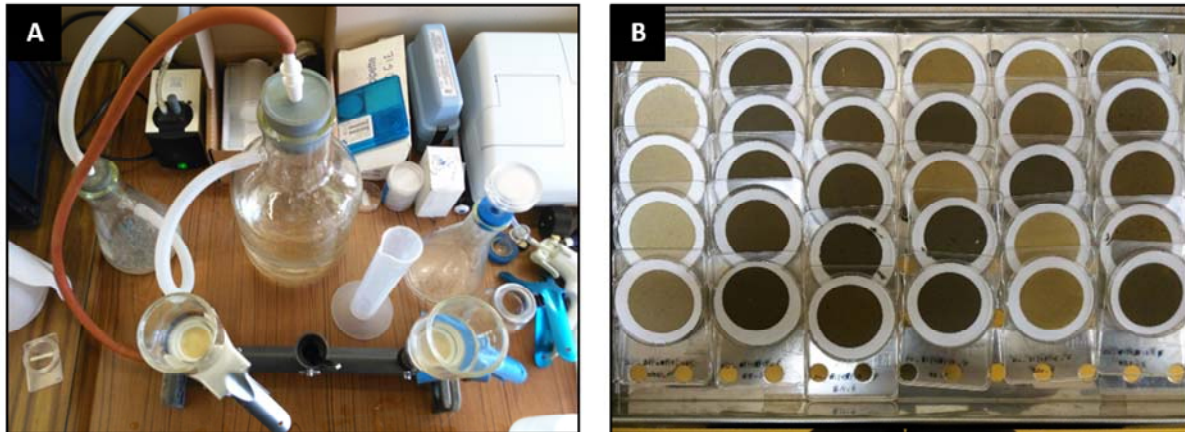


Figure 6 : Dispositif de filtration – (A) Rampe de filtration et (B) visualisation des filtres avant la mise à l'étuve.

2.1.3. Relation Turbidité/MES : optimisation de la méthode de calibration

L'utilisation de capteurs optiques est problématique en raison de la variabilité spatiale et temporelle des MES [Sternberg et al., 1991]. Par conséquent, il est préférable de calibrer les capteurs optiques à partir de particules en suspension naturelles prélevées directement sur le terrain [Sternberg et al., 1986; Downing and Beach, 1989; Kineke and Sternberg, 1992]. Dans notre cas, pour des concentrations inférieures à quelques $g.L^{-1}$, une relation linéaire peut être établie entre la concentration en MES [$mg.L^{-1}$] déterminées à partir des prélèvements d'eau réalisées sur la section (rive droite, centre et rive gauche) et le signal de turbidité [NTU] obtenus à partir du capteur optique OBS-3+ [Sternberg et al., 1991; Kineke and Sternberg, 1992]. Un travail spécifique sur la construction des droites de calibration NTU/MES a été réalisé dans le cadre du projet SUSPENSE [Druine, 2018]. Une méthode par classe de turbidité a été proposée, permettant de limiter l'influence des valeurs extrêmes. Les calibrations obtenues sur les 3 sites d'étude (campagnes du 05 et 06/06/2018) à sont illustrées sur la figure 7, avec l'estimation d'un intervalle de confiance de 95% (percentiles 2.5 et 97.5%) permettant d'évaluer la précision de la relation établie.

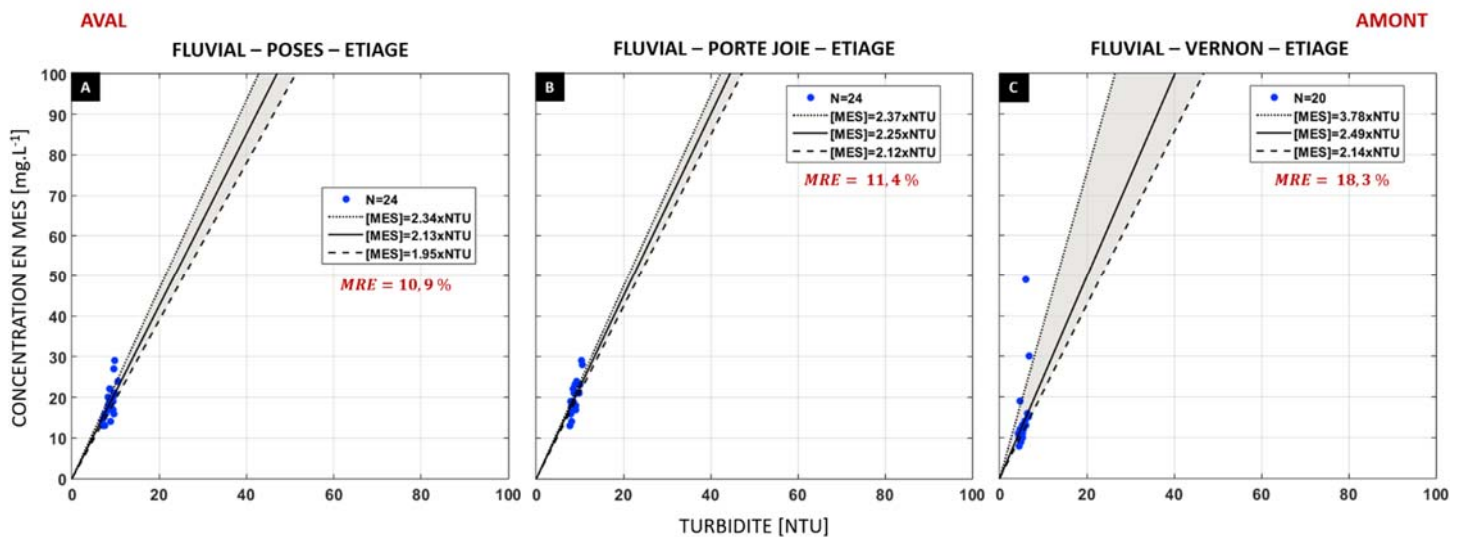


Figure 7 : Relation de calibration entre le signal de turbidité [NTU] et les concentrations en MES [mg.L⁻¹] sur les sites de Poses, Porte-Joie et Vernon, avec l'estimation de l'erreur moyenne relative [MRE - %].

2.1.4. Estimation des incertitudes sur les concentrations estimées

La qualité et la robustesse des concentrations en MES obtenues à partir des capteurs optiques peuvent être évaluées en calculant une erreur relative moyenne entre les valeurs de concentrations en MES mesurées et celles calculées à partir des différentes relations de calibration (Figure 7). L'erreur relative est définie comme suit :

$$MRE = \frac{\sum |C - C_0|}{\sum C_0} \times 100 \quad (2)$$

Où MRE est l'erreur relative moyenne [*Mean Relative Error* - %], C est la valeur de concentration en MES [en mg.L⁻¹] obtenue en multipliant les données brutes des instruments (turbidité - NTU) par le coefficient de calibration déterminé; et C_0 correspond à la valeur de concentration mesurée [en mg.L⁻¹] obtenue par la pesée des filtrations réalisées à partir des prélèvements horaires.

2.2. Quantification des concentrations en matières en suspension par les capteurs acoustiques

Les étapes de calibration et de traitement des données *in situ* acquises à partir d'un ADCP vertical, décrites dans cette partie, pourront être appliquées aux données acquises par l'ADCP horizontal dans la suite du projet avec l'installation du ponton à Porte-Joie.

2.2.1. Principe de l'ADCP : vitesses d'écoulement et intensité rétrodiffusée

Les profileurs acoustiques de vitesse à effet Doppler ont initialement été développés pour l'exploitation spatio-temporelle de profils verticaux de vitesse et plus récemment, pour quantifier les concentrations en MES dans les domaines océaniques et côtiers [Thorne and Hanes, 2002 ; Le Coz et al., 2009]. Les données 3D de vitesse ont ainsi été recueillies sur la section de la Seine à l'aide de l'ADCP 600 kHz déployé sur un bateau en mouvement et équipé d'un D-GPS (correction du positionnement par l'appareil). La figure 8 montre la géométrie de la mesure des vitesses de courant et des intensités rétrodiffusées par un ADCP positionné en surface. Les quatre transducteurs de l'ADCP (céramiques à la fois émettrices et réceptrices) émettent, indépendamment les uns des autres, des impulsions acoustiques (*pings*) orientées de 20° par rapport à la verticale [Le Coz et al., 2007]. L'écho de retour est lié à la réflexion de l'onde émise par les particules en suspension dans la colonne d'eau. Si les particules sont immobiles, le signal reçu par le transducteur aura la même fréquence que celui qui a été émis. Si le courant éloigne ou rapproche les particules, la fréquence reçue diffère de la fréquence émise et est affectée d'un décalage, appelé l'effet Doppler [Marion, 2010].

Pour chaque profil vertical, les vitesses de courant sont mesurées sur l'ensemble de la cellule (« *bin* ») de hauteur prédéfinie par l'opérateur. Une moyenne pondérée des vitesses (U) est calculée puis affectée au centre de la cellule. Les intensités rétrodiffusées (NR) sont, quant à elles, mesurées sur la moitié supérieure de la cellule [Deines, 1999]. En fonction du diamètre de la céramique, de la hauteur de cellules (« *bin* ») et de l'ouverture du faisceau acoustique (θ), le volume d'échantillonnage (Vol) peut mesurer de quelques cm^3 à plus de $1000\ cm^3$ [Le Coz et al., 2007]. Les limitations de l'appareil empêchent de connaître les caractéristiques de certaines zones aveugles (« *Blank* ») : (i) au niveau de la surface et des berges en raison des résonances émises par les transducteurs et (ii) au niveau du fond par des émissions secondaires générant des échos d'intensités parasites.

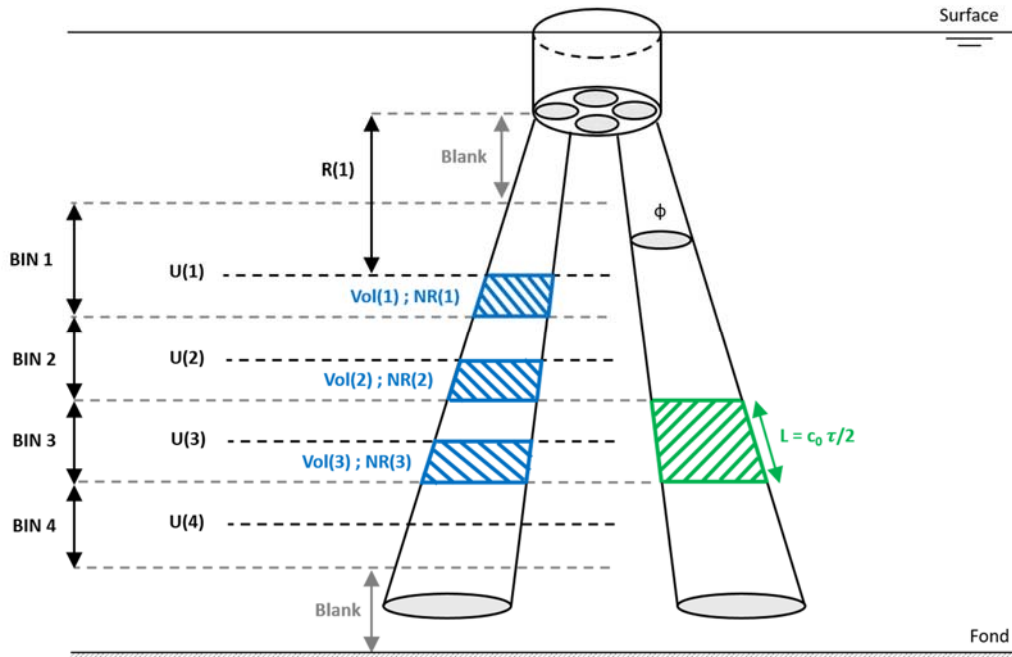


Figure 8 : Schéma de la géométrie des mesures de vitesse de courant $U(i)$ et d'intensité du signal rétrodiffusé $NR(i)$ par les particules dans un volume d'eau donnée $Vol(i)$, réalisées par un ADCP RDI positionné en surface. $R(1)$ représente la distance verticale allant du transducteur à la base de la première mesure d'intensité rétrodiffusée [d'après Tessier, 2006].

2.2.2. Calibration empirique du signal acoustique

Pour des concentrations en MES inférieures à $0,2 \text{ g.L}^{-1}$, telles que sur les stations fluviales (Rouen et Val des Leux), l'atténuation liée aux particules [$\alpha_s - \text{dB.m}^{-1}$] devient négligeable [Tessier, 2006]. Obtenue à partir du niveau reçu par l'ADCP [NR – count], la valeur de l'indice de rétrodiffusion volumique [IV – dB] prend seulement en compte les pertes de transmission liées à l'eau [$\alpha_w - \text{dB.m}^{-1}$] selon :

$$IV = NR - NE + 20 \log_{10}(\psi R) - 10 \log_{10}(V) + 2 \int_0^R \alpha_w(r) dr \quad (3)$$

L'approche la plus simple pour évaluer les profils de concentration à l'aide d'un ADCP suppose que la concentration en MES est la principale source de rétrodiffusion. En faisant ces hypothèses au sein de la zone fluviale, l'indice de rétrodiffusion volumique obtenu avec l'équation 4.1 peut également s'exprimer en fonction de la concentration massique selon :

$$IV = 10 \log_{10} \left(\frac{MES_{OBS} \bar{\sigma}}{\rho_s \bar{v}_s} \right) = 10 \log_{10}(MES_{OBS}) + 10 \log_{10} \left(\frac{\bar{\sigma}}{\rho_s \bar{v}_s} \right) \quad (4)$$

Dans ce cas, le \log_{10} de la concentration en MES [$MES_{OBS} - g.L^{-1}$] mesurée à partir de l'OBS-3+ préalablement calibré, peut être corrélé de manière linéaire (relation du type, $y = ax + b$) à l'indice de rétrodiffusion [$IV - dB$] calculé à partir du signal de rétrodiffusion brute de l'ADCP, comme :

$$10 \log_{10}(MES_{OBS}) = \alpha IV + \beta \quad (5)$$

La concentration M est alors estimée pour l'ensemble des profils ADCP de la manière suivante :

$$M = 10^{(\alpha IV + \beta)/10} \quad (6)$$

Un exemple de ce type de relation obtenue entre IV et le $\log_{10}(MES_{OBS})$ est illustré sur la figure 9 – **A** (courbe jaune), pour le site de Porte-Joie (06/06/18) en période de débit moyen ($539 \text{ m}^3.s^{-1}$).

CALIBRATION – PORTE JOIE – 06062018 – DEBIT MOYEN

$p = 1,04 - r = 0,39$
ME = 0,8 mg.L⁻¹ - MAE = 1.7 mg.L⁻¹ - MRE = 8.7%

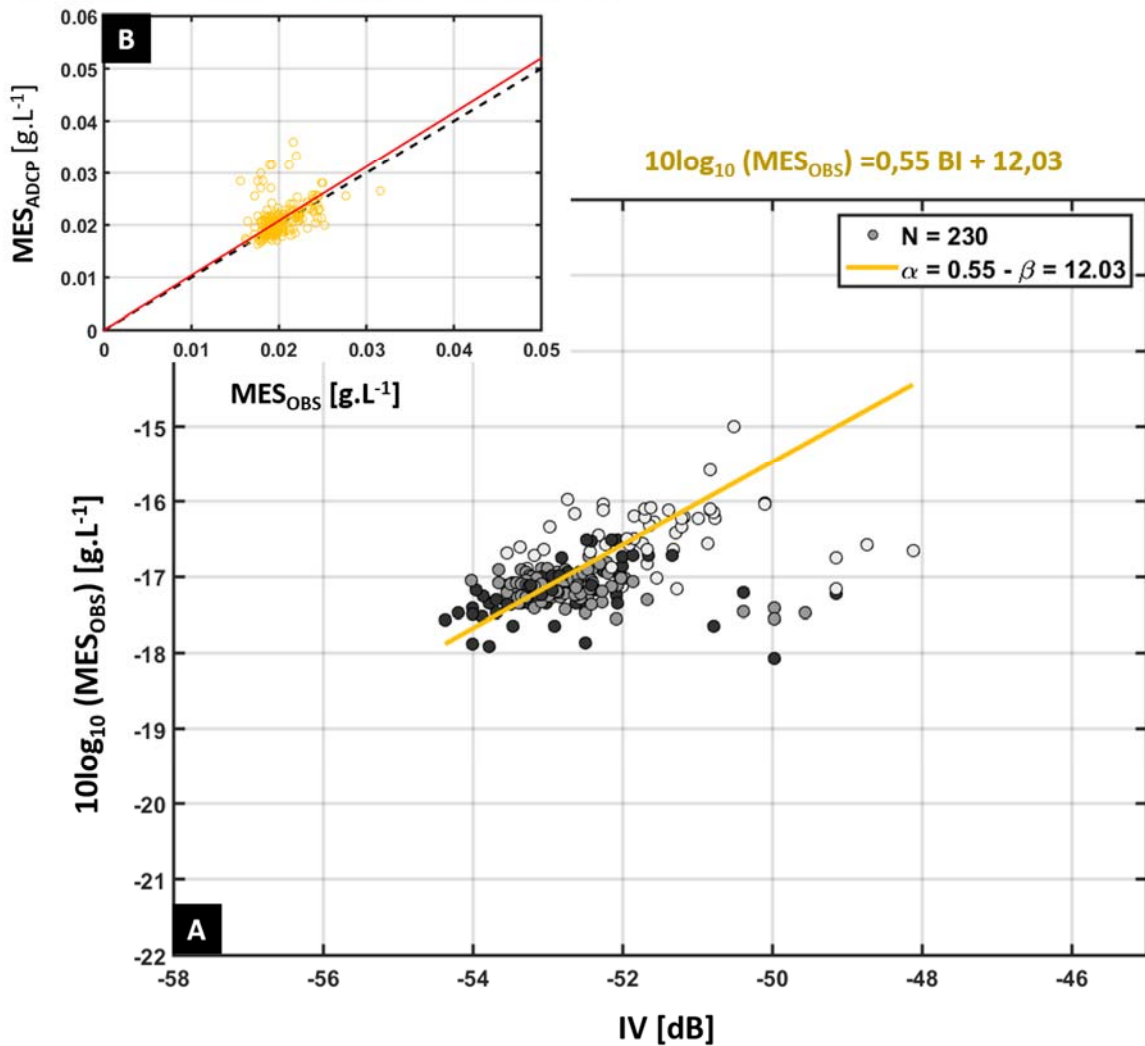


Figure 9 : Calibration empirique du signal acoustique – (A) Exemple obtenu entre l'indice de rétrodiffusion de l'ADCP [IV – dB] et les concentrations massiques en MES [$10 \log_{10}(MES_{OBS})$ – g.L⁻¹], sur le site de Porte-Joie (06/06/18) en période de débit moyen (539 m³.s⁻¹), avec une distinction Rive Droite (RD – blanc), le Centre (C – gris clair) et la Rive Gauche (RG – gris foncé) – (B) Comparaison entre les concentrations en MES calculées à partir de l'ADCP [MES_{ADCP} – g.L⁻¹] et celles obtenues à l'aide de l'OBS [MES_{OBS} – g.L⁻¹] à partir des coefficients de calibration obtenus (α et β). La ligne noire en pointillé représente la droite 1 :1, tandis que le trait plein rouge représente la droite de corrélation (où p = pente de la droite, ME = Erreur Moyenne [mg.L⁻¹], MAE = Erreur Absolue Moyenne [mg.L⁻¹], MRE = Erreur moyenne relative [%] et r = coefficient de corrélation).

2.2.3. Validation de l'inversion du signal acoustique

La qualité de l'inversion acoustique et par conséquent, des concentrations en MES obtenues à partir de l'ADCP [$MES_{ADCP} - g.L^{-1}$] est évaluée par comparaison avec les concentrations en MES calculées avec l'OBS-3+ [$MES_{OBS} - g.L^{-1}$]. Différentes erreurs sont calculées à partir des formules suivantes dans le but de quantifier la dispersion entre MES_{ADCP} et MES_{OBS} :

(i) L'erreur quadratique moyenne normalisée [*normalised Root Mean Square Error – %*] :

$$nRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (MES_{ADCP} - MES_{OBS})^2} \quad (7)$$

(ii) L'erreur moyenne ou résidu moyen [*Mean Error – g.L⁻¹*] :

$$ME = \frac{1}{N} \sum (MES_{ADCP} - MES_{OBS}) \quad (8)$$

(iii) L'erreur absolue moyenne [*Mean Absolute Error – g.L⁻¹*] :

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |MES_{ADCP} - MES_{OBS}| \quad (9)$$

(iv) L'erreur moyenne relative [*Mean Relative Error – %*] :

$$MRE = \frac{\sum |MES_{ADCP} - MES_{OBS}|}{\sum MES_{OBS}} \times 100 \quad (10)$$

Où N est le nombre de données. ME représente le biais des MES_{ADCP} par rapport aux MES_{OBS} . Un ME positif signifie la surestimation de l'ADCP, tandis qu'un ME négatif signifie une sous-estimation. L'ampleur de MAE indique l'écart moyen entre MES_{ADCP} et MES_{OBS} , et MRE est le pourcentage de MAE par rapport à la moyenne MES_{OBS} [Ha et al., 2011 ; Park et Lee, 2016]. La $nRMSE$ combine les incertitudes en terme de biais (médiane des erreurs relatives) et d'imprécision (différence entre le quantile 10 et 90% – dispersion de la donnée) [Raymond, 2011].

Synthèse – Calibration empirique

La méthode de calibration et le calcul des erreurs ont été appliquée sur les profils ADCP réalisés sur les sites de Poses, Porte-Joie et Vernon, durant les campagnes du 05 et 06/06/2018. Une synthèse des résultats est donnée dans le tableau 2 ci-dessous. La première partie de ce tableau reprend le coefficient de calibration entre l'indice de rétrodiffusion IV et les concentrations en MES de l'OBS-3+ par condition de débit. La seconde partie juge de la corrélation entre les concentrations ADCP (MES_{ADCP}) et OBS-3+ (MES_{OBS}) par la pente de la droite, le coefficient de corrélation et les erreurs associées (ME : *Mean Error* ; MAE : *Mean Absolute Error* ; MRE : *Mean Relative Error*).

De manière générale, la pente (α proche de 1) et le coefficient (r) de la droite de corrélation montrent une très bonne adéquation entre les mesures de concentrations en MES obtenues avec l'ADCP et avec l'OBS-3+. Les valeurs de ME positive (de l'ordre de 0,3 à 0,8 mg.L⁻¹) montrent une légère surestimation des concentrations par rapport à l'OBS-3+, avec des différences normalisées de l'ordre de 7,4 à 8,7% (stations confondues).

Tableau 2 : Tableau de synthèse des calibrations empiriques (pente α et intersection β) entre l'indice IV et les concentrations MES_{OBS} avec leurs erreurs associées sur les sites de Poses, Porte-Joie et Vernon.

Data	Débit [m ³ .s ⁻¹]	Pente (α)	Intersection (β)	Corrélation		ME [mg.L ⁻¹]	MAE [mg.L ⁻¹]	MRE [%]
				$MES_{ADCP} =$ αMES_{OBS} a	r			
Poses	539	0,50	9,01	1,02	0,51	0,4	1,4	7,4
Porte Joie	539	0,55	12,03	1,04	0,39	0,8	1,7	8,7
Vernon	487	0,44	4,59	1,01	0,76	0,3	1,1	7,5

3. Résultats et discussion

3.1. Suivi en continu des concentrations en MES sur le site de Porte-Joie

L'installation de la sonde de turbidité NKE-STBD à Porte-Joie, de janvier à juin 2018, a permis de suivre l'évolution des concentrations en MES depuis un débit de crue exceptionnelle (supérieur à $2200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) jusqu'à un retour au débit moyen (env. $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Les concentrations en MES [$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$] sur obtenues à partir de la calibration du signal de turbidité [NTU] sont présentées en figure 10. Deux périodes de mesures ont été écartées de l'interprétation (entre le 26/03 et le 29/03/2018 ; entre le 15/04 et le 17/05/2018) et raison de l'encrassement et de la dérive des mesures, malgré une vérification et une programmation fréquente de la sonde *in situ*.

En janvier 2018, les concentrations en MES enregistré atteignent un maximum autour de $85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ avant le pic de crue, puis diminuent progressivement début février 2018 avec des valeurs proche de $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Deux pics de concentrations en MES (supérieurs à $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), observés sur une courte période en mi-février et mi-juin 2018, sont liés à une légère hausse des débits sur ces intervalles de temps (respectivement supérieurs à 1500 et $900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – Figure 10 – **B**). Le reste du temps, les concentrations oscillent autour de $15\text{-}20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Figure 10 – **C**).

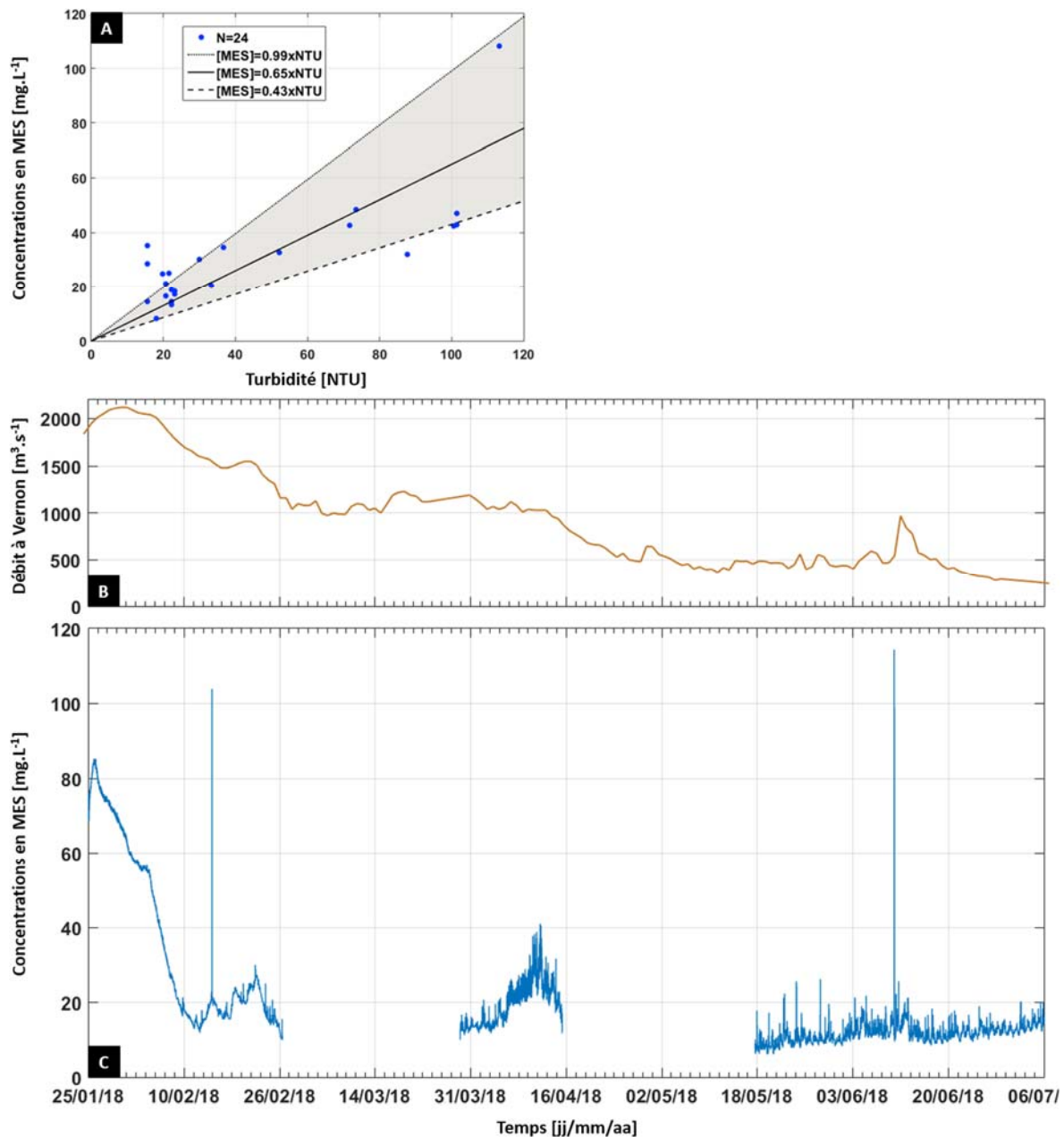


Figure 10 : Données acquises sur le site de Porte-Joie en période de crue (débit supérieur à $2200 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) – (A) Courbe de calibration NTU/[MES] de la sonde de turbidité STBD – (B) Série temporelle du débit journalier de la Seine à Vernon [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] – (C) Dynamique des concentrations en MES [mg.L^{-1}], obtenues à partir du signal de turbidité de la sonde STBD [NTU] placée à 1m sous la surface.

3.2. Inter-comparaison des profils de concentrations en MES et de vitesses d'écoulement issus de l'inversion acoustique sur les différents sites d'études

3.2.1. Traitement des données basse-fréquence ADCP

Les données brutes sont traitées afin d'extraire les vitesses [ou magnitude en $m.s^{-1}$] ainsi que les directions du courant [°] de chacune des cellules (0,25 m) du transect. Les données en lien avec les trajets longitudinaux et transversaux (déplacement Est et Nord [m]) enregistrés par l'ADCP pour chaque cellule sont sorties du jeu de données brutes dans le but de vérifier la trajectoire du bateau au cours de chaque transect, illustrées en figure 11.

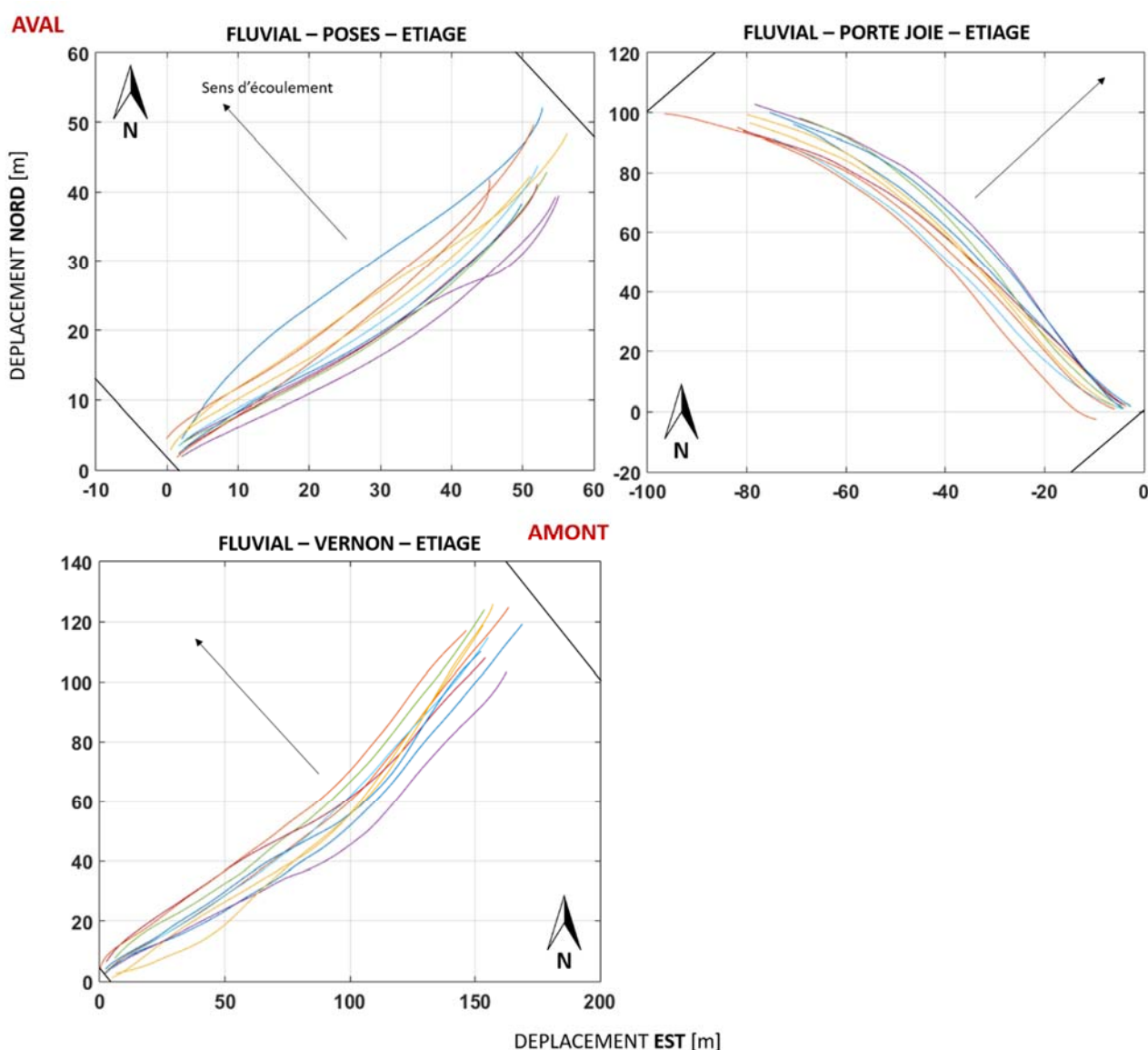


Figure 11 : Trajectoires du bateau enregistrées par l'ADCP sur les campagnes réalisées à Poses, à Porte-joie et à Vernon, le 05 et 06/06/2018.

3.2.2. Vitesses d'écoulement sur la section transversale ciblée

Une fois l'ensemble des données traitées, la répartition des vitesses de courant sur la section transversale a pu être étudiée sur les 3 sites d'étude, à savoir Poses, Porte-Joie et Vernon. Parmi les 10 transects réalisés par sites d'étude, deux transects (le premier et le dernier) sont présentés en figure 12 sur chacun des sites dans le but d'illustrer les tendances générales observées entre l'amont (Vernon) et l'aval (Poses – Barrage).

De manière générale, sur la période d'acquisition (3-4h par site), les profils de vitesses d'écoulement semblent relativement homogènes dans le temps. Visible sur les sites de Porte-Joie et de Vernon, les vitesses d'écoulement seront alors plus élevées dans le chenal de navigation (autour de 0,5-1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) et vont progressivement diminuer en se rapprochant des berges (inférieures à 0,5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – Figure 12). A l'inverse, la largeur de la section à Poses, plus courte (70 m), ne permet pas d'observer cette tendance (vitesses homogènes sur la section entre 0,5 et 1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

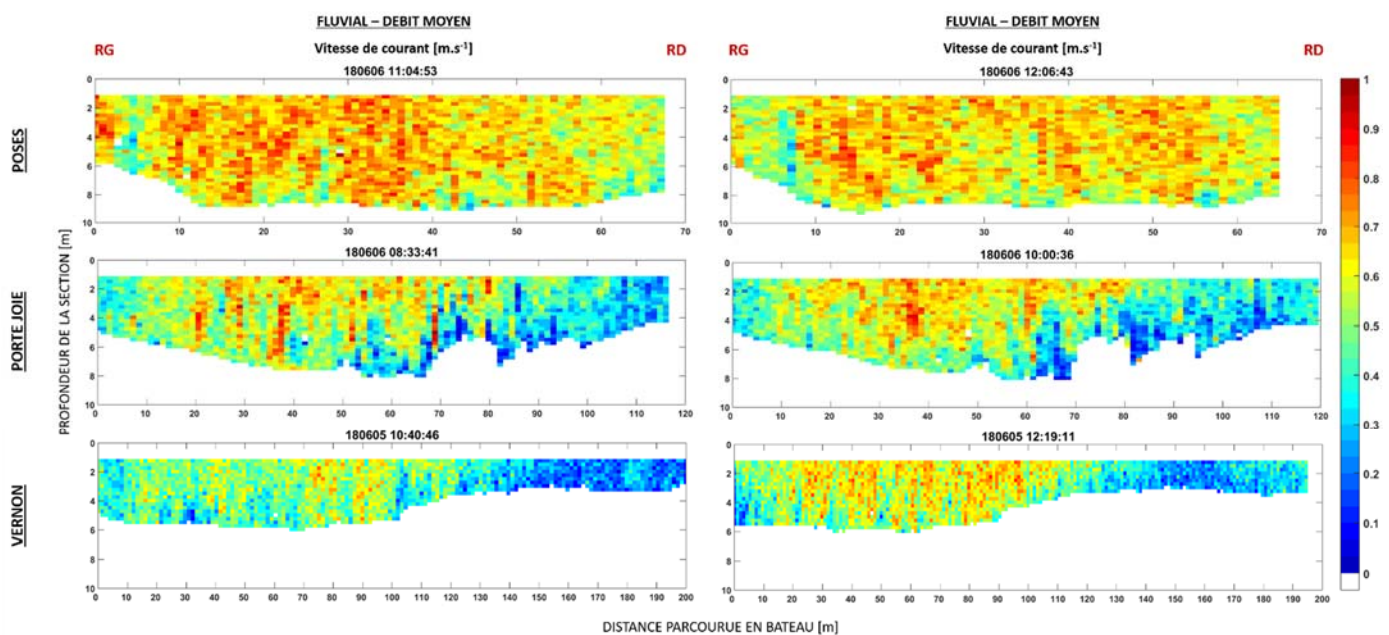


Figure 12 : Répartition des vitesses de courant [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] mesurées par l'ADCP 1200kHz sur les sections transversales ciblées de Poses, Porte-Joie et Vernon (campagnes d'acquisition du 05 et 06/06/2018 – débit moyen journalier entre 487 et 539 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$).

3.2.3. Concentrations en MES sur la section transversale ciblée

Les données d'intensité acoustique rétrodiffusée acquises à partir de l'ADCP sont uniquement corrigées des atténuations liées à l'eau (α_w) puis étalonnées en concentration en MES à partir des données issues des profils verticaux (OBS-3+/LISST). La calibration empirique permet ainsi de convertir l'ensemble des transects acoustiques acquis à partir l'ADCP en concentration en MES. Parmi les 10 transects réalisés par site d'étude, deux transects (le premier et le dernier) sont illustrés figure 13 sur chacun des sites dans le but d'évaluer la répartition des concentrations en MES sur la section ciblée. Les cellules présentant des valeurs élevées par rapport aux cellules voisines (cellules rouges) sont probablement à mettre en lien avec la présence de bulles dans la colonne d'eau et ne doivent pas être pris en compte.

De manière générale, sur les 3-4h d'acquisitions réalisées sur les 3 sites d'étude, les concentrations en MES semblent relativement homogènes (i) dans le temps, (ii) sur la section transversale ciblée et (iii) d'amont en aval, avec des concentrations en MES oscillant autour de 10 à 30 mg.L⁻¹ (Figure 13). Concernant le site de Porte-Joie, les ordres de grandeurs des concentrations en MES mesurées par l'ADCP coïncident quasiment avec ceux enregistrées par la sonde de turbidité NKE-STBD (15 à 30 mg.L⁻¹ pour l'ADCP contre 15-20 mg.L⁻¹ pour la NKE-STBD).

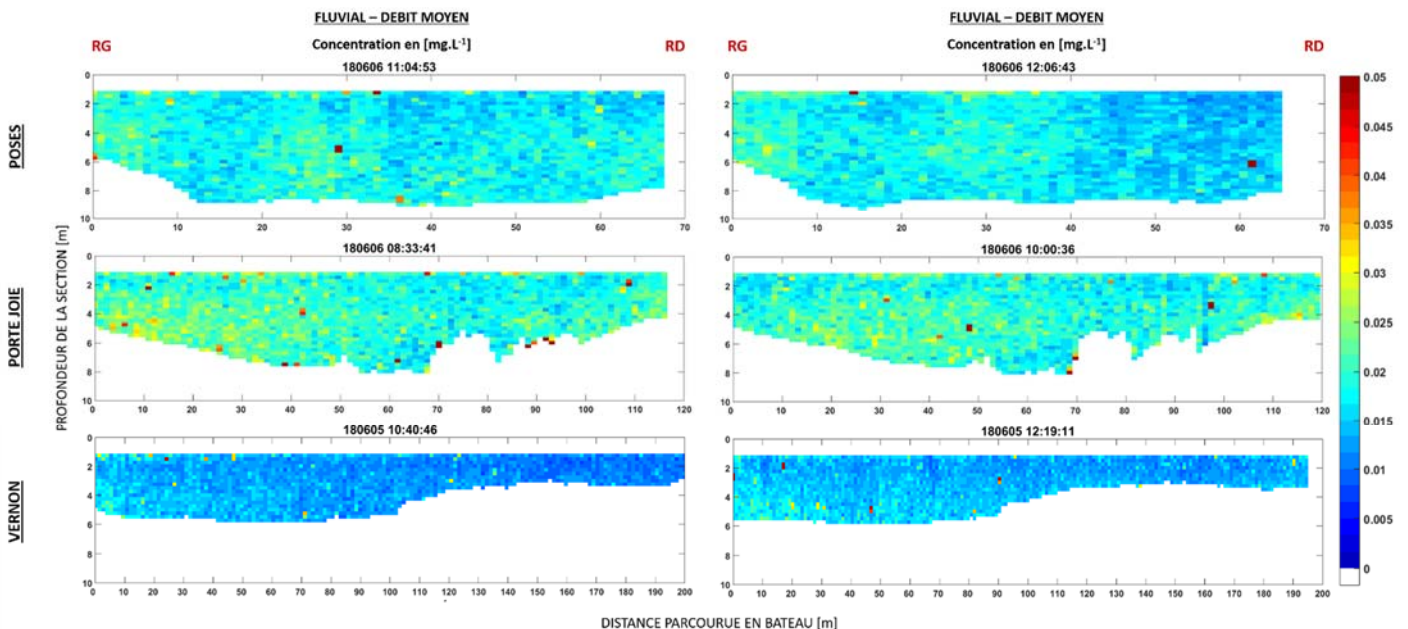


Figure 13 : Répartition des concentrations en MES [g.L⁻¹] mesurées par l'ADCP 1200kHz sur les sections transversales ciblées de Poses, Porte-Joie et Vernon (campagnes d'acquisition du 05 et 06/06/2018 – débit moyen journalier entre 487 et 539 m³.s⁻¹).

Conclusion

L'installation d'une sonde de turbidité (NKE-STBD) à haute fréquence sur le site de Porte-Joie (proche berge) a permis d'étudier l'évolution des concentrations en MES d'un débit de crue exceptionnelle (supérieur à $2200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) à un débit moyen (autour de $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). La variabilité des débits va alors avoir un impact direct sur les concentrations en MES dans la colonne d'eau : une hausse des débits sera précédée d'une hausse des concentrations en MES (entre 80 et $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ à Porte-Joie).

En parallèle, des transects ADCP ont été réalisés sur la section dans le but d'évaluer la variabilité spatiale des concentrations en MES et des vitesses d'écoulement sur le site de Porte-Joie, ainsi que sur les sites de Poses et de Vernon en comparaison. Concernant les vitesses d'écoulement, les résultats obtenus montrent *(i)* dans le temps, une homogénéité des profils de vitesses d'écoulement (3-4h d'acquisition par site) *(ii)* sur la section, une diminution des vitesses d'écoulement entre le chenal de navigation et les berges (à l'exception de Poses, avec des vitesses homogènes en raison d'une largeur de section réduite).

Concernant les concentrations en MES, une méthode d'inversion empirique a été utilisée pour inverser les profils d'intensités rétrodiffusées des ADCP en concentrations de MES, tout en minimisant au maximum les erreurs estimées sur la concentration ADCP par rapport à celle de l'OBS3+ (erreurs relatives entre 7 et 9%). Les résultats montrent des concentrations en MES relativement homogènes *(i)* dans le temps, *(ii)* sur la section transversale ciblée et *(iii)* d'amont en aval. Sur le site de Porte-Joie, les concentrations enregistrées à proximité de la berge par la sonde de turbidité NKE-STBD concordent avec ceux acquis par l'ADCP.

Malgré la non installation du ponton à Porte-Joie, les campagnes de mesures réalisées durant la première phase du projet PHRESQUE ont permis d'avoir un premier aperçu de la représentativité des concentrations en MES et des vitesses d'écoulement sur la section transversale ciblée. Les premiers résultats ont ainsi démontré l'intérêt scientifique du site de Porte-Joie dans le suivi des paramètres hydro-sédimentaires en amont du barrage de Poses.

Références bibliographiques

- Campbell Scientific INC., 2014.** OBS-3+ and OBS300 Suspended Solids and Turbidity Monitors – Instruction Manual. Available on Web, accessed January 2017, at <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/obs-3+.pdf>.
- Deines, K.L., 1999.** Backscattering estimation using broadband acoustic Doppler current profilers. *Proceedings of IEEE conference, 6th Working Conference on Current Measurement*, San Diego, USA, 249–253.
- Downing, J. and Beach, R.A., 1989.** Laboratory apparatus for calibration optical suspended solids sensors. *Marine Geology*, 86, 243–249.
- Downing, J., Sternberg, R.W. et Lister, C.R.B., 1981.** New instrumentation for investigation of sediment suspension in the shallow marine environment. *Marine Geology*, 42, 19–34.
- Druine, F., 2018.** Flux sédimentaires en estuaire de Seine : Quantification et variabilité multi-échelle sur la base de mesures de turbidité (réseau SYNAPSES). *PhD Thesis*, Université de Rouen, 247pp.
- Ha, H.K., Maa, J.P.Y., Park, K. et Kim, Y.H., 2011.** Estimation of high-resolution sediment concentration profiles in bottom boundary layer using pulse-coherent acoustic Doppler current profilers. *Marine Geology*, 279, 199–209.
- Kineke, G.C. and Sternberg, R.W., 1992.** Measurements of high concentration suspended sediments using the optical backscatterance sensor. *Marine Geology*, 108, 253–258.
- Le Coz, J., Chastan, B., Védié, F. et Dramais, G., 2007.** Jaugeage des rivières par ADCP : une revue de synthèse. *La Houille Blanche – Revue internationale de l'eau, EDP Sciences*, 4, 119–130.
- Le Coz, J., Larrarte, F., Saysset, G., Pierrefeu, G., Brochot, J.F. et Marchand, P., 2009.** Mesures hydrologiques par profileur à effet Doppler (aDcp) en France : application aux cours d'eau et aux réseaux urbains. *La Houille Blanche – Revue internationale de l'eau, EDP Sciences*, 3, 115–122.
- Marion, C., 2010.** Dynamique et bilans des transferts particuliers de radioéléments d'origine anthropique et naturelle dans le Golfe du Lion : cas particulier des apports rhodaniens. *PhD Thesis*, Université de Perpignan, France, 436pp.
- NF EN 872, 2005.** Qualité de l'eau – Dosage des matières en suspension – Méthode par filtration sur filtre en fibres de verre. *AFNOR*, Paris, France.

- Park, H.B. and Lee, G.H., 2016.** Evaluation of ADCP Backscatter Inversion to Suspended Sediment Concentration in Estuarine Environments. *Ocean Science Journal*, 51, 109–125.
- Pelletier, C., 2013.** Mesure de la turbidité. *Technique de l'ingénieur*, 25pp.
- Sternberg, R.W., Johnson, R.V. II, Cacchione, D.A. et Drake, D.E., 1986.** An instrument system for monitoring and sampling suspended sediment in the benthic boundary layer. *Marine Geology*, 71, 187–199.
- Sternberg, R.W., Kineke, G.C. et Johnson, R.V., 1991.** An instrument system for profiling suspended sediment, fluid, and flow conditions in shallow marine environments. *Continental Shelf Research*, 11, 109–122.
- Tessier, C., 2006.** Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière: l'exemple de la région marine Bretagne Sud. *PhD thesis*, Université de Bordeaux 1, 428pp.
- Tessier, C., Le Hir, P., Lurton, X. et Castaing, P., 2008.** Estimation de la matière en suspension à partir de l'intensité rétrodiffusée des courantomètres acoustiques à effet Doppler (ADCP). *Comptes Rendus Geosciences*, 340, 57–67.
- Thorne, P.D. and Hanes, D.M., 2002.** A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. *Continental Shelf Research*, 22, 603–632.