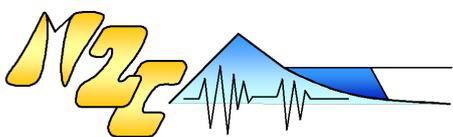


SUSPENSE

Représentativité des sites de mesures SYNAPSES
selon différentes conditions hydrodynamiques

08/2018

Flavie DRUINE, Julien DELOFFRE, Romaric VERNEY,
Jean-Philippe LEMOINE et Robert LAFITE



Ifremer



TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	3
TABLE DES ILLUSTRATIONS	4
INTRODUCTION	6
CHAPITRE 1 – INSTRUMENTATION ET ACQUISITION <i>IN SITU</i>	8
1 Campagnes de mesures <i>in situ</i>	8
2 Stratégie d'acquisition sur le cycle de marée semi-diurne	9
CHAPITRE 2 – METHODOLOGIE D'ETUDE	11
1 Quantification des concentrations en matières en suspension par les capteurs acoustiques	11
1.1 Principe de l'ADCP : vitesses de courant et intensité acoustiques	11
1.2 Méthodologie d'inversion du signal acoustique	12
1.2.1 Equation du sonar	12
1.2.2 Stations fluviales : Calibration empirique	14
1.2.3 Stations du bouchon vaseux : Méthode hybride	16
1.3 Validation de l'inversion du signal acoustique	19
2 Profils de concentrations en MES issus de l'inversion acoustique	22
2.1 Validation des données ADCP et SYNAPSES	22
2.2 Concentrations en MES sur la section transversale ciblée	23
CHAPITRE 3 – RESULTATS	24
1 Site de ROUEN	24
2 Site de VAL DES LEUX	31
3 Site de TANCARVILLE	37
4 Site de FATOUVILLE	43
CONCLUSION	48
BIBLIOGRAPHIE	49



TABLE DES ILLUSTRATIONS

- Figure 1** : Carte de l'estuaire de Seine : limite de l'estuaire, localisation des sites d'étude et séries temporelles de la turbidité [NTU], enregistrées par le réseau SYNAPSES et du débit [$m^3.s^{-1}$], enregistrées à Vernon, sur la période de septembre 2014 à mai 2017. 7
- Figure 2** : (A) Illustration du dispositif de mesure – (B) Photo de la cage équipée des instruments, YSI/CTD (OBS-3+) et LISST. 10
- Figure 3** : Aperçu des transects d'acquisition ADCP et des profils verticaux OBS/LISST/prélèvements. 10
- Figure 4** : 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. 12
- Figure 5** : Calibration empirique du signal acoustique. 15
- Figure 6** : Calibration du signal acoustique par la méthode hybride. 18
- Figure 7** : Trajectoires du bateau enregistrées par l'ADCP sur les campagnes réalisées à Val-des-Leux (condition d'étiage et de VE) et à Tancarville (condition d'étiage et de ME). 22
- Figure 8** : Répartition des concentrations en MES [$g.L^{-1}$] estimées à partir de l'ADCP 600kHz sur la section transversale, sélectionnée suivant (i) le compartiment fluvial (Val-des-Leux) ou TMZ (Fatouville) et (ii) les périodes caractéristiques du cycle de marée, à savoir la basse mer, le flot, la pleine mer et le jusant. Le rectangle rouge marque l'emplacement de la station SYNAPSES. 23
- Figure 9** : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes. Exemple pris sur les sites de Rouen en période : (A) d'étiage/VE et (B) d'étiage/ME. 26
- Figure 10** : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes. Exemple pris sur les sites de Rouen en période : (A) de crue/VE et (B) de crue/ME. 27
- Figure 11** : Corrélations établies sur le site de Rouen entre les mesures de concentrations ponctuelles de MES du réseau SYNAPSES et les concentrations moyennes de MES issues de l'ADCP. 29
- Figure 12** : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes. Exemple pris sur les sites de Val des Leux en période : (A) d'étiage/VE et (B) d'étiage/ME. 32
- Figure 13** : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes. Exemple pris sur les sites de Val des Leux en période : (C) de crue/VE et (D) de crue/ME. 33

Figure 14 : Corrélations établies sur le site de Val des Leux entre les mesures de concentrations ponctuelles de MES du réseau SYNAPSES et les concentrations moyennes de MES issues de l'ADCP.	35
Figure 15 : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes Exemple pris sur les sites de Tancarville en période : (A) d'étiage/VE et (B) d'étiage/ME.	38
Figure 16 : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes. Exemple pris sur les sites de Tancarville en période : (C) de crue/VE et (D) de crue/ME.	39
Figure 17 : Corrélations établies sur le site de Tancarville entre les mesures de concentrations ponctuelles de MES du réseau SYNAPSES et les concentrations moyennes de MES issues de l'ADCP.	41
Figure 18 : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes.	44
Figure 19 : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes. Exemple pris sur les sites de Fatouville en période : (C) de crue/VE et (D) de crue/ME.	45
Figure 20 : Corrélations établies sur le site de Fatouville entre les mesures de concentrations ponctuelles de MES du réseau SYNAPSES et les concentrations moyennes de MES issues de l'ADCP.	47
Tableau 1 : Bilan des campagnes d'acquisitions sur les sections transversales ciblées (entre septembre 2016 et avril 2017).	8
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 Rouen et Val-des-Leux (stations fluviales).	20
Tableau 3 : Tableau de synthèse des calibrations hybride (pente α , l'intersection β et le diamètre optimum) entre l'indice IV et les concentrations MES_{OBS} avec leurs erreurs associées sur les sites de Tancarville et Fatouville (stations du bouchon vaseux).	21

INTRODUCTION

Le développement des réseaux de mesures haute-fréquence est aujourd'hui un élément clé pour (i) suivre la qualité des eaux, (ii) comprendre la variabilité des MES et (iii) estimer des flux sédimentaires à haute fréquence et sur le long terme au sein des systèmes estuariens. Dans ce contexte, depuis 2011, le Grand Port Maritime de Rouen (GPMR) et le GIP Seine Aval coordonnent la mise en place et la mise en œuvre du réseau de mesures haute-fréquence, SYNAPSES (SYstème de surveillaNce Automatisé de la PhySico-chimie en Estuaire de Seine), en réponse à une forte demande de la communauté scientifique et des acteurs locaux. Son objectif est (i) de permettre un suivi long terme haute-fréquence des principaux paramètres physico-chimique liés à la qualité de l'eau sur différentes stations de l'estuaire de Seine (conductivité/salinité, température, oxygène dissous, fluorescence et turbidité) et (ii) d'améliorer la connaissance sur le fonctionnement du système estuarien d'un point de vue hydrodynamique et sédimentaire. Les mesures sont réalisées par l'intermédiaire de sondes multi-paramètres YSI 6600V2, sur 5 stations situées à proximité des berges entre le compartiment fluvial et l'embouchure de l'estuaire de Seine : dans la zone d'eau douce, Rouen et Val des Leux ; dans la zone de turbidité maximale, Tancarville, Fatouville et Balise A (Figure 1 – **A**). Les données sont acquises toutes les 5 minutes en sub-surface (1m) à l'exception de Balise A, et également à 1m au-dessus du fond pour les 3 stations localisées dans la zone de turbidité maximale (le bouchon vaseux ; i.e. Fatouville – Tancarville – Balise A), où le gradient vertical est le plus important (Figure 1 - **B**).

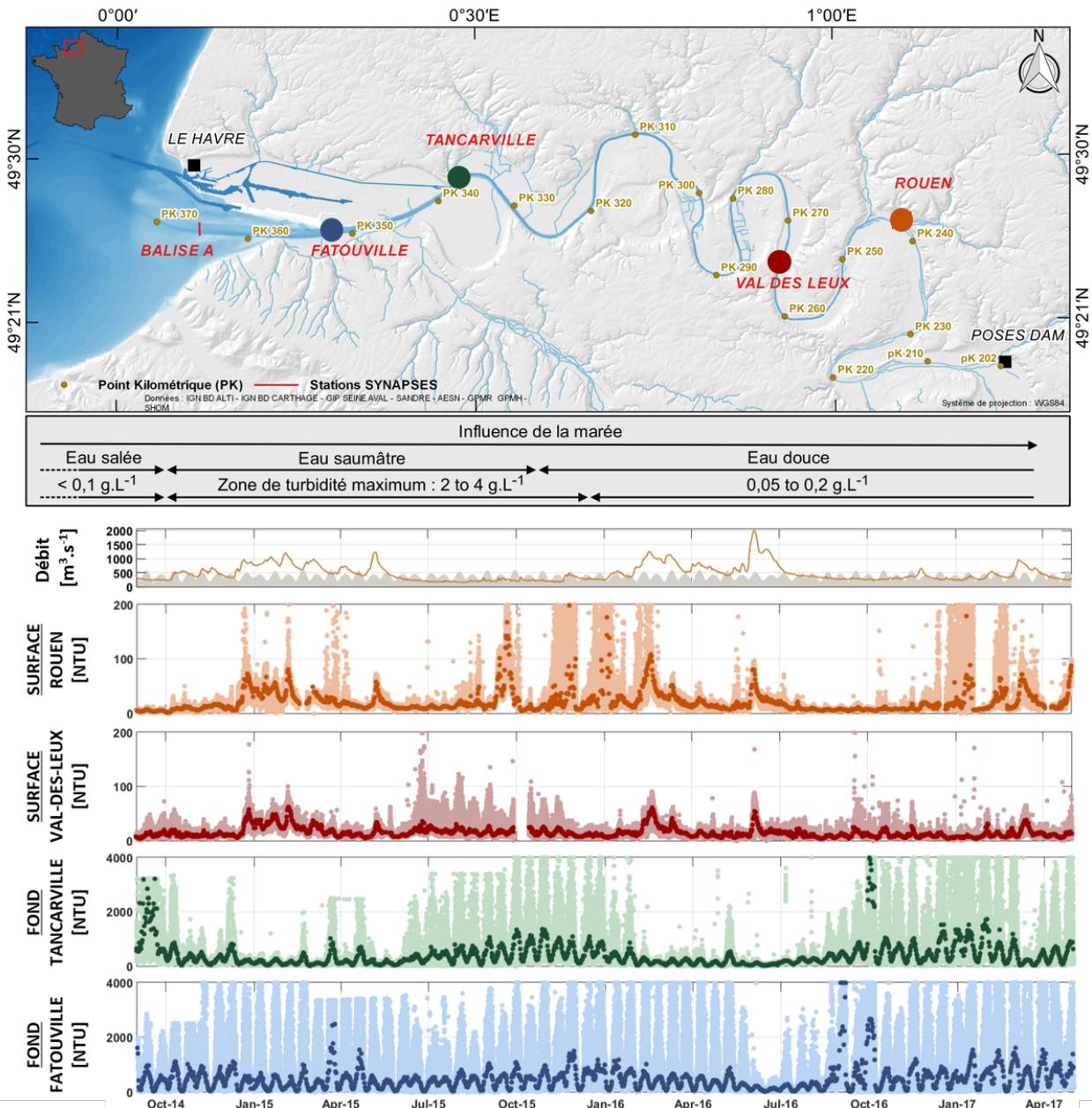
En appui du réseau de mesures haute-fréquence sur l'estuaire de Seine (SYNAPSES), le projet scientifique SUSPENSE vise à améliorer notre connaissance de l'évolution spatiale et temporelle des flux sédimentaires au sein de l'estuaire de Seine. L'objectif principal de cette étude est alors de qualifier et de valoriser les mesures de turbidité acquises dans le cadre d'un réseau de mesures haute fréquence sur l'estuaire de Seine (SYNAPSES) à la fois (i) en terme de suivi de la dynamique des MES du compartiment fluvial au bouchon vaseux et (ii) en terme d'estimation des flux de MES sur différentes sections transversales de l'estuaire de Seine. L'atteinte de cet objectif nécessite de lever 3 principaux verrous scientifiques :

- 1/ L'analyse de la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des MES et la quantification des concentrations en (MES) à partir des mesures de turbidités,
- 2/ L'analyse de la variabilité transversale des concentrations en MES et de la représentativité des stations SYNAPSES,
- 3/ La mise en place d'une méthodologie de calcul des flux sédimentaires à partir des données SYNAPSES et l'analyse de leurs variabilités.



Le projet SUSPENSE est un projet collaboratif entre le laboratoire UMR CNRS 6143 M2C de l'Université Rouen Normandie, l'IFREMER et le GIP Seine-Aval. Ce projet scientifique repose principalement sur les travaux de thèse de Flavie DRUINE [Druine, 2018].

Le présent rapport technique se focalise sur la partie du projet portant sur la représentativité spatiale des mesures du réseau SYNAPSES réalisées proche berge vis-à-vis de la variabilité des concentrations en MES sur l'ensemble de la section transversale ciblée, à l'échelle du cycle de marée et pour différentes forçages hydrodynamiques (cycle lunaire : VE/ME et débit : crue/étiage).



CHAPITRE 1 – INSTRUMENTATION ET ACQUISITION *IN SITU*

Le planning des campagnes de mesure *in situ* et la stratégie d'acquisition des données ont été établis afin de comprendre la dynamique des MES sous l'effet (i) des variabilités temporelles des principaux forçages hydrodynamiques (marée / débit) et (ii) des variabilités spatiales sur la section transversale ciblée.

1 Campagnes de mesures *in situ*

Afin d'évaluer la représentativité des mesures ponctuelles issues du réseau SYNAPSES du cycle de marée semi-diurne aux échelles pluriannuelles, 16 campagnes d'acquisitions de données ont été réalisées sur les sections transversales à la Seine au niveau des stations SYNAPSES, entre septembre 2016 et avril 2017. Afin de couvrir une large gamme de conditions hydrodynamiques, le planning des campagnes de mesure a été établi de manière à englober (i) deux gammes de débit : en période d'étiage (septembre/octobre 2016 – débit moyen à 268 m³/s) et en période de débit soutenu (mars/avril 2017 – débit moyen à 682 m³/s) ; et (ii) deux phases du cycle lunaire : en VE (coefficient de marée entre 80 et 110) et en ME (coefficient de marée entre 30 et 37). Le tableau 2.2 reprend l'ensemble des campagnes effectuées sur les sections transversales de Fatouville, Tancarville, Val des Leux et Rouen.

Tableau 1 : Bilan des campagnes d'acquisitions sur les sections transversales ciblées (entre septembre 2016 et avril 2017).

SITE	ETIAGE (Sept. – Oct. 16)			CRUE (Fév. – Mars 17)		
	DATE	COEFFICIENT DE MARÉE	DEBIT MOYEN JOURNALIER [m ³ /s]	DATE	COEFFICIENT DE MARÉE	DEBIT MOYEN JOURNALIER [m ³ /s]
FATOUVILLE	09-Sept.	ME 46 - 35	270	13-Mars	VE 98	833
	16-Sept.	VE 94 - 99	274	20-Mars	ME 45 - 40	628
TANCARVILLE	12-Sept.	ME 36 - 41	261	15-Mars	VE 95 - 93	774
	19-Sept.	VE 110 - 108	282	22-Mars	ME 30	606
VAL DES LEUX	24-Sept.	ME 55	282	27-Mars	VE 92 - 96	609
	29-Sept.	VE 80 - 84	242	04-Avr.	ME 57	424
ROUEN	26-Sept.	ME 49 - 54	264	29-Mars	VE 105 - 108	516
	01-Oct.	VE 89	254	06-Avr.	ME 50	422

2 Stratégie d'acquisition sur le cycle de marée semi-diurne

Afin de comprendre les hétérogénéités spatiales des concentrations en MES sur la section transversale ciblée, les vitesses de courant et les intensités acoustiques rétrodiffusées ont été mesurées toutes les 10 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 600kHz. Ces mesures ont été programmées à une fréquence d'acquisition de 1Hz et une résolution verticale de 50 cm. Le déploiement de l'ADCP a été effectué à partir d'un bateau (Figure 2 – **A** et Figure 3 – **A**), en mode autonome par le suivi du fond (*Bottom-tracking*) 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 2 – **B**) équipée de deux sondes multi-paramètres (turbidimètres OBS et YSI, ce dernier étant identiques à ceux utilisés dans le réseau SYNAPSES) et d'un granulomètre laser *in situ* (LISST 100X-C – fréquence à 1Hz), auxquels seront synchronisés des mesures ADCP ponctuelles. Ces profils sont couplés, toutes les heures, à des prélèvements d'eau en sous-surface (à environ 1m) et à 1m au-dessus du fond.

Afin de déterminer la variabilité 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 3 – **B**). Les profils de concentrations en MES estimés à partir de la calibration des sondes de turbidité (OBS-3+ uniquement) vont permettre d'inverser le signal acoustique rétrodiffusé de l'ADCP par une calibration empirique ou théorique (*cf. Chapitre 2. Méthodologie d'étude*) afin d'obtenir des concentrations en MES sur l'ensemble de la section.



Figure 2 : (A) Illustration du dispositif de mesure – (B) Photo de la cage équipée des instruments, YSI/CTD (OBS-3+) et LISST.

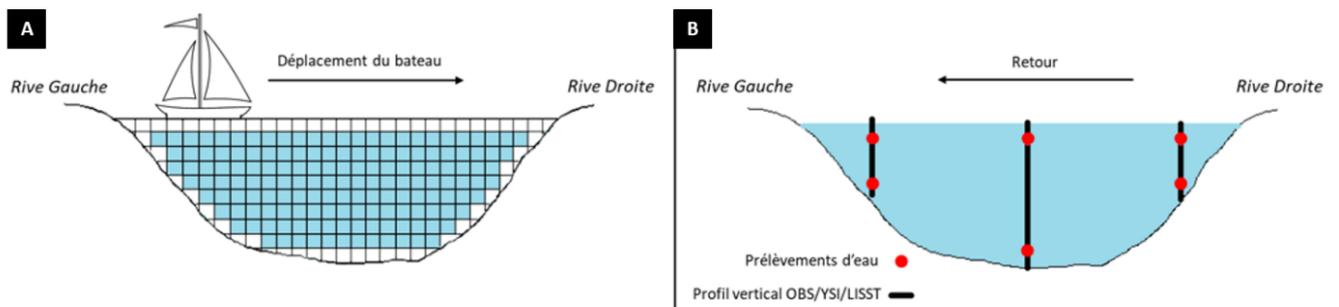


Figure 3 : Aperçu des transects d'acquisition ADCP et des profils verticaux OBS/LISST/prélèvements – (A) Schéma de la répartition des points de mesures de vitesse et d'intensité rétrodiffusée acquises par l'ADCP, les zones blanches correspondant aux zones aveugles par l'ADCP ; (B) Schéma de la répartition 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).



Les sections suivantes discuteront (i) de la méthodologie de quantification des concentrations en MES sur la section transversale à partir des capteurs acoustiques et (ii) de la disponibilité des données ADCP et SYNAPSES pour évaluer la représentativité des stations de mesures hautes-fréquence.

1 Quantification des concentrations en matières en suspension par les capteurs acoustiques

1.1 Principe de l'ADCP : vitesses de courant et intensité acoustiques

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 2.12 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 [Le Coz et al., 2008].

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.



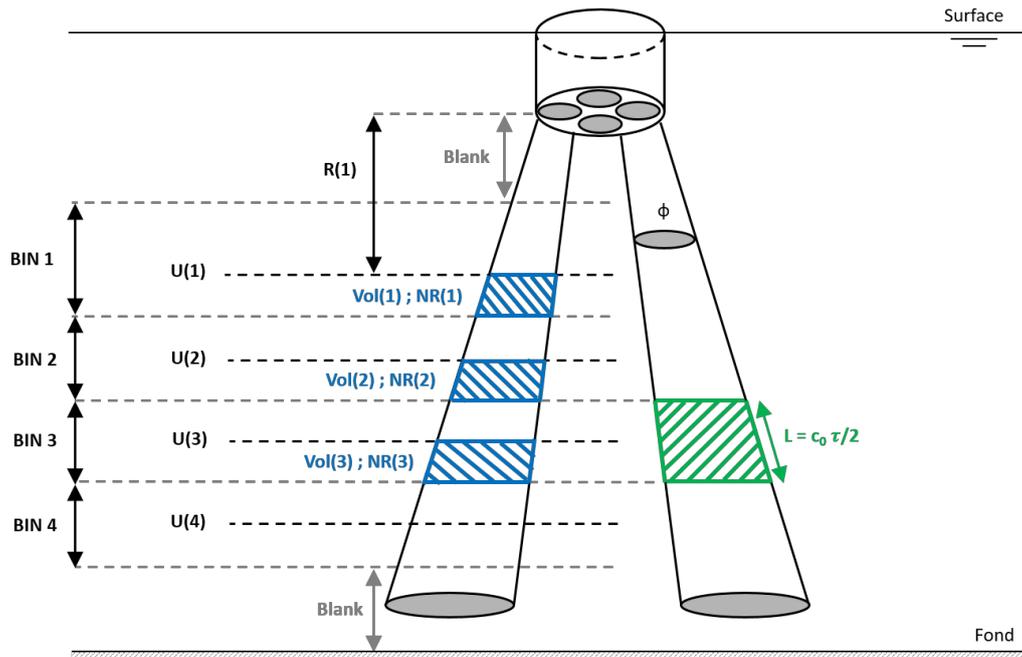


Figure 4 : Schéma de la géométrie des mesures de vitesse de courant $U(i)$ et d'intensité du signal rétrodiffusé $NR(i)$ par les particules dans un volume d'eau donnée $Vol(i)$, réalisées par un ADCP RDI positionné en surface. $R(1)$ représente la distance verticale allant du transducteur à la base de la première mesure d'intensité rétrodiffusée [d'après Tessier, 2006].

1.2 Méthodologie d'inversion du signal acoustique

1.2.1 Equation du sonar

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. Ce signal peut être utilisé pour estimer les concentrations en MES dans la colonne d'eau, après une étape de calibration de l'appareil [Tessier et al, 2008]. Pour relier ce signal enregistré par l'appareil à la charge de particules en suspension dans l'eau, un bilan d'énergie entre l'émission (NE) et la réception (NR) doit être établi suivant l'équation du sonar [Deines, 1999] :

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

$$NR = NE - 20\log_{10}(R^2) - 2R(\alpha_w + \alpha_s) + 10\log_{10}(V) + IV \quad (2)$$

Niveau émis NE [$\text{dB}_{/1\mu\text{Pa}/1\text{m}}$] :

Le niveau acoustique émis (NE) est obtenu (i) soit par calibration de l'ADCP en laboratoire dans un bassin ($=217,8 \text{ dB}_{/1\mu\text{Pa}/1\text{m}}$), (ii) soit directement auprès du constructeur ($=217,1 \text{ dB}_{/1\mu\text{Pa}/1\text{m}}$).



Niveau reçu NR [$\text{dB}_{/1\mu\text{Pa}/1\text{m}}$] :

Le niveau reçu (NR) est calculé à partir des signaux bruts d'intensités rétrodiffusées enregistrés par l'appareil en count (NC) et des données constructeurs, selon la relation de calibration suivante :

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

Où Br est le seuil de bruit (=70 dB), NC_0 est un niveau plancher en dessous duquel l'appareil ne répond plus (~64 dB) et K_c est un coefficient (~40 dB/counts).

Perte de transmission PT due à l'amortissement de l'onde :

Les pertes de transmission (PT) sont liées (i) la divergence sphérique de l'onde et (ii) à l'atténuation due au milieu environnant fonction de :

<p><u>Atténuation liée à l'eau α_w</u></p> $\alpha_w = f(f, P, T, S)$ <p>→ Paramètres issus des profils verticaux</p>	<p><u>Atténuation liée aux sédiments α_s</u></p> $\alpha_s = f([MES], a_s, c, \rho)$ <p>→ Nécessité de connaître les caractéristiques des particules</p>
---	--

Où f est la fréquence acoustique de l'appareil, P est la pression, T est la température, S est la salinité, $[MES]$ est la concentration en MES, a_s est le rayon moyen des particules, c est la célérité de l'onde et ρ est la densité des particules.

Indice de rétrodiffusion IR :

Les pertes de transmission (IR) dépendent de la densité numérique moyenne des particules (N) dans un volume d'eau donné (V) et de la section efficace de rétrodiffusion moyenne de ces particules :

$$IR = 10 \log_{10}(\bar{\sigma}N) + 10 \log_{10}(V) = IV + 10 \log_{10}(V) \quad (4)$$

Où IV correspond à l'indice de rétrodiffusion volumique.

En exprimant la densité numérique $[N]$ en fonction de la concentration massique $[M]$, de la masse volumique $[\rho_s]$ et du volume individuel moyen des particules $[\bar{v}_s]$, $N = M/\rho_s \bar{v}_s$, l'indice de rétrodiffusion volumique (IV) s'écrit de la manière suivante :

$$IV = 10 \log_{10} \left(\frac{M\bar{\sigma}}{\rho_s \bar{v}_s} \right) \quad (5)$$



Le calcul des différents termes de l'équation du sonar (Equation 2) doit être assez précis pour évaluer directement les concentrations en MES. Or, d'une part, l'accès aux données constructeur n'est pas toujours garanti, et d'autre part, la variabilité des propriétés des particules (en matière de nature et de taille de MES) présentes dans la colonne d'eau peut devenir problématique à évaluer et à intégrer dans l'inversion [Tessier, 2006]. La méthodologie à appliquer va dépendre des conditions de mesure (gamme de concentrations en MES dans la colonne d'eau) et de la variabilité des particules.

1.2.2 Stations fluviales : Calibration empirique

Pour des concentrations en MES inférieures à 0,2 g.L⁻¹, telles que sur les stations fluviales (Rouen et Val des Leux), l'atténuation liée aux particules [α_s – 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 [α_w – dB.m⁻¹] selon :

$$IV = NR - NE + 20 \log_{10}(\psi R) - 10 \log_{10}(V) + 2 \int_0^R \alpha_w(r) dr \quad (6)$$

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 :

$$IV = 10 \log_{10} \left(\frac{MES_{OBS} \bar{\sigma}}{\rho_s \bar{v}_s} \right) = 10 \log_{10}(MES_{OBS}) + 10 \log_{10} \left(\frac{\bar{\sigma}}{\rho_s \bar{v}_s} \right) \quad (7)$$

Dans ce cas, le log₁₀ 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 :

$$10 \log_{10}(MES_{OBS}) = \alpha IV + \beta \quad (8)$$

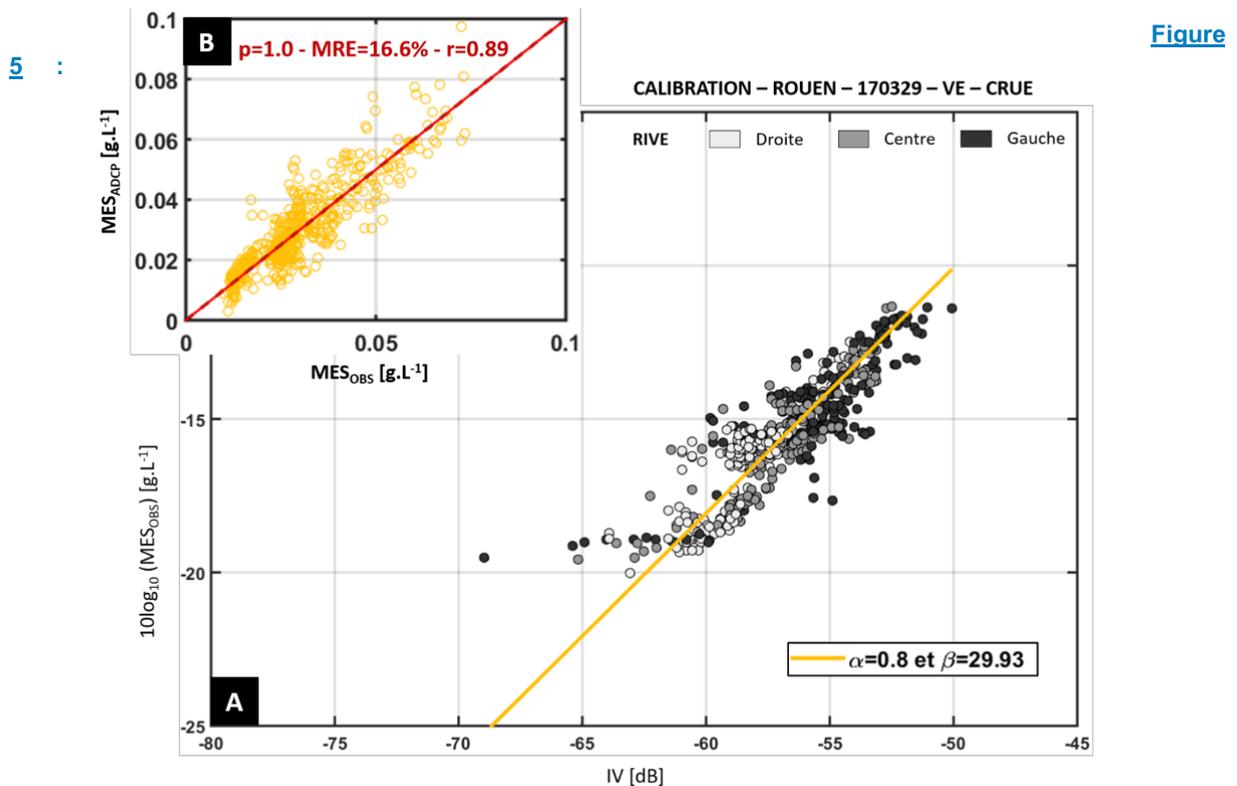
La concentration M est alors estimée pour l'ensemble des profils ADCP de la manière suivante :

$$M = 10^{(\alpha IV + \beta)/10} \quad (9)$$



Un exemple de ce type de relation obtenue entre IV et le $\log_{10}(MES_{OBS})$ est illustré sur la figure 5 – **A** (courbe jaune), pour un cycle de marée à Rouen (29/03/17) en période de VE (108–109) et de fin de crue ($516 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Les concentrations en MES calculées semblent corrélées avec celles de l'OBS-3+ (figure 5 – **B**) avec un coefficient de corrélation à 0,89 et une erreur relative moyenne de 16,6%.

Afin d'évaluer la variabilité spatiale des mesures ponctuelles, différentes couleurs sont employées dans la figure 5 – **A** pour différencier le positionnement de ces mesures sur la section (prélèvements surface/fond et profils de turbidité/d'intensité rétrodiffusée), à savoir la Rive Droite (RD), le Centre (C) et la Rive Gauche (RG). A première vue, la dispersion aléatoire des points reflète que le positionnement des mesures ponctuelles n'a pas d'impact sur la relation linéaire entre IV et le $\log_{10}(MES_{OBS})$ et les interprétations établies précédemment. De manière plus précise, les concentrations en MES de la rive gauche de Rouen semblent plus importantes que celles de la rive droite, traduisant une variabilité spatiale entre les deux rives sur cette station. Cette tendance est également observée sur le site de Val-des-Leux, avec des concentrations plus importantes sur la rive droite par rapport à la rive gauche.



1.2.3 Stations du bouchon vaseux : Méthode hybride

A l'inverse, sur les stations du bouchon vaseux, la large gamme de concentrations en MES allant de 0,01 à 4,5 g.L⁻¹ nécessite de combiner à la fois la calibration empirique et la méthode théorique dans le but d'optimiser les concentrations en MES et de leurs incertitudes sur l'ensemble de la section transversale ciblée.

Le jeu de données dont les estimations de concentrations sont inférieures à 0,2 g.L⁻¹, sont isolées afin d'appliquer la méthode de calibration empirique développée sur les stations fluviales (cf. 1.1.2. Stations fluviales : Calibration empirique). Une des relations obtenues entre IV [dB] et le $\log_{10}(MES_{OBS})$ [g.L⁻¹], uniquement inférieure à 0,2 g.L⁻¹, est illustrée sur la figure 6 – **A** pour un cycle de marée à Fatouville (13/03/17 – en condition de fort débit (833 m³.s⁻¹) et de VE). Sur cette gamme de concentration inférieure à 0,8 g.L⁻¹, les concentrations en MES calculées sont correctement corrélées à celles de l'OBS-3+ avec un coefficient de corrélation à 0,80 et une erreur relative moyenne de 14,9%.

La concentration à partir de laquelle l'atténuation liée aux particules devient non négligeable est de l'ordre de 0,2 g.L⁻¹ [Tessier, 2006]. Par conséquent, à partir de l'ensemble des termes décrits précédemment, l'équation du sonar se développe de la manière suivante :

$$NR = NE - 40 \log_{10}(\Psi R) - 2 \int_0^R (\alpha_w(r) + \alpha_s(r)) dr + 10 \log_{10}(V) + IV \quad (10)$$

A partir d'une méthode théorique, l'objectif est donc de résoudre cette équation et d'obtenir, in fine, les profils de concentrations en MES. Or, la grandeur M intervient dans l'estimation du coefficient d'atténuation liée aux particules (α_s) et de l'indice de rétrodiffusion volumique (IV), pour donner :

$$10 \log_{10}(M) = \underbrace{NR - NE}_{\text{Signal}} + \underbrace{20 \log_{10}(\Psi R) + 2 \int_0^R (\alpha_w(r) + \alpha_s(r)) dr}_{\text{Transmission}} \quad (11)$$

$$\underbrace{-10 \log_{10} \left(\pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 L \right)}_{\text{Géométrie}} - \underbrace{10 \log_{10} \left(\frac{\bar{\sigma}}{\rho_s v_s} \right)}_{\text{Caractérisation des particules}}$$

En procédant de manière itérative, cellule par cellule, les concentrations massiques (M) et l'atténuation induite (α_s) sont calculées alternativement jusqu'à converger, sous réserve de connaître certains paramètres cruciaux : (i) les concentrations en MES dans la colonne d'eau à partir d'une autre méthode *in situ*, à savoir l'OBS-3+ dans notre cas, (ii) certaines conditions environnementales telles que la salinité et la température, acquises à partir de la CTD, et (iii) les caractéristiques des MES telles que le rayon moyen des particules [$a_s - m$], inconnues dans notre cas.



Les systèmes acoustiques à fréquence unique, tel que l'ADCP utilisé dans cette étude, sont connus pour être fortement dépendant de la variabilité des tailles de particules [Gartner, 2004 ; Park and Lee, 2016]. Si la distribution granulométrique est uniforme dans le temps et l'espace, le signal acoustique rétrodiffusé peut être efficacement utilisé pour mesurer les concentrations en MES [Hanes, 2012]. Cependant, dans un environnement estuarien où les processus de floculation et de défragmentation sont dominants, l'utilisation d'une seule population de particules sur le cycle de marée n'est pas une bonne représentation de la réalité. Par conséquent, le résultat est biaisé lorsque qu'un unique diamètre médian est utilisé dans le processus d'inversion acoustique des données de terrain où la distribution granulométrique des sédiments change continuellement dans le temps et l'espace. Ces conclusions ont également été démontrées par Ha et al. [2011] en laboratoire et sur le terrain dans la Baie de Mobile, en Alabama (US).

La modification des propriétés des particules au cours d'un même cycle de marée nécessite donc de faire varier le diamètre médian des particules dans l'équation du sonar à résoudre. Un diamètre médian des particules est proposé par groupes de profils OBS réalisés sur la section, dans le but d'inverser correctement le signal acoustique en concentration massique tout au long du cycle de marée. Un exemple d'application de l'inversion acoustique par optimisation du diamètre médian est illustré Figure 6 – B, pour un cycle de marée à Fatouville (13/03/17 – en condition de fort débit et de VE). Huit diamètres médians 'optimum', compris entre 44 et 77 μm , sont estimés tout au long du cycle de marée et semblent être représentatifs des tailles de particules observées dans le milieu. Les concentrations massiques MES_{ADCP} obtenues à partir du signal acoustique sont alors d'un ordre de grandeur cohérent avec les concentrations MES_{OBS} de référence sur une gamme comprise entre 0,2 et 2 g.L^{-1} .

La transition entre les deux méthodes est ajustée à l'aide d'un coefficient A ($MES_{ADCP} = (MES_{Théorique} \times A) + (MES_{Empirique} \times (1 - A))$ où $A = (MES_{OBS} - 0.15)/0.05$) sur la gamme de concentrations comprises entre 0,15 à 0,2 g.L^{-1} . Les concentrations massiques obtenues [$MES_{ADCP} - \text{g.L}^{-1}$] à partir de la méthode hybride sont ensuite comparées aux valeurs calibrées à partir de l'OBS-3+ en (Figure 6 – B). Avec un coefficient de corrélation à 0,89 et une erreur relative moyenne de 35,8%, les concentrations de l'ADCP [$MES_{ADCP} - \text{g.L}^{-1}$] semble corrélérer avec celles de l'OBS-3+ [$MES_{OBS} - \text{g.L}^{-1}$]. Les profils de concentrations en MES résultants, concordent avec les mesures ponctuelles OBS dans diverses conditions de terrain, confirmant l'applicabilité de cette méthode hybride.



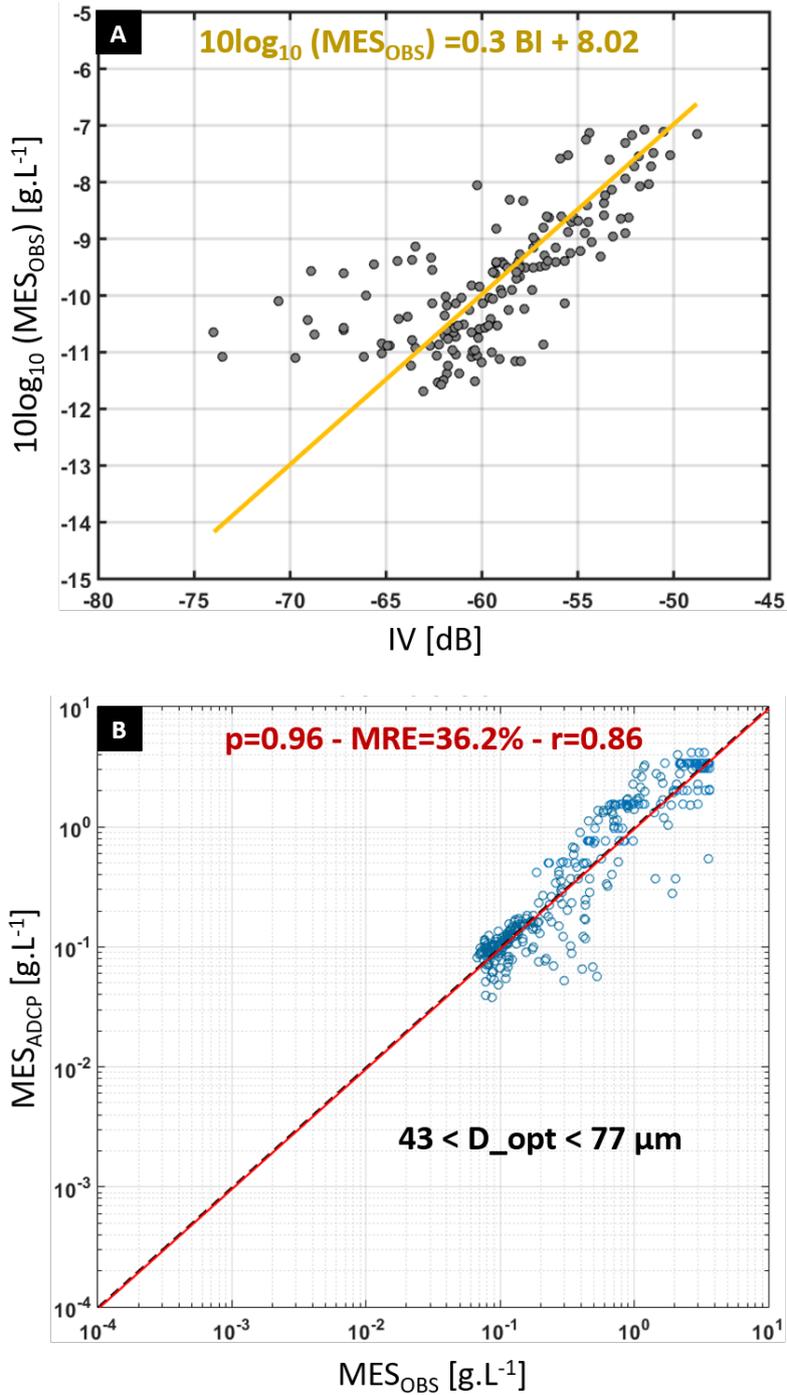


Figure 6 : Calibration du signal acoustique par la méthode hybride – (A) Exemple de calibration empirique obtenue entre l'indice de rétrodiffusion de l'ADCP [IV – dB] et les concentrations massiques en MES inférieures à 0,2 g.L⁻¹ [$10 \log_{10} (MES_{OBS}) - g.L^{-1}$], sur le site de Fatouville (170313) en période de fort débit (833 m³.s⁻¹) et de VE (97) – (B) Comparaison entre les concentrations calculées à partir de l'ADCP [$MES_{ADCP} - g.L^{-1}$] et celles obtenues à l'aide de l'OBS [$MES_{OBS} - g.L^{-1}$] suivant la méthode hybride. 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, MRE = Erreur moyenne relative [%] et r = coefficient de corrélation).

1.3 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 – %*] :

$$nRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (MES_{ADCP} - MES_{OBS})^2} \quad (12)$$

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

$$ME = \frac{1}{N} \sum (MES_{ADCP} - MES_{OBS}) \quad (13)$$

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

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |MES_{ADCP} - MES_{OBS}| \quad (14)$$

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

$$MRE = \frac{\sum |MES_{ADCP} - MES_{OBS}|}{\sum MES_{OBS}} \times 100 \quad (15)$$

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 sur les stations fluviales

La méthode de calibration et le calcul des erreurs ont été appliquée à l'ensemble des campagnes de mesure réalisées sur la zone fluviale. La première partie du tableau 2 reprend le coefficient de calibration entre l'indice de rétrodiffusion IV et les concentrations en MES de l'OBS-3+, par condition de marée et 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) 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 négatives (de l'ordre de 0 à 0,7 mg.L⁻¹) montrent une légère sous-estimation des concentrations par rapport à l'OBS-3+, avec des différences normalisées de 16,6 à 17,4% et de 16,1 à 20,8%, respectivement pour Rouen et Val-des-Leux. Un cycle de marée à Val-des-Leux (condition de VE et de crue) présente de large sous-estimation des concentrations en MES (environ 2 mg.L⁻¹) avec une erreur relative moyenne de 26%, en raison de la gamme de turbidité plus forte sur cette campagne. Ces écarts sont équivalents à ceux observés par Tessier et al [2008] en Bretagne du Sud (différences normalisées entre 17 et 27%), plus faibles que ceux estimés par Gartner [2004] entre un ADCP 1200kHz et un OBS-3+ en baie de San Francisco (différence moyenne de 35,0 à 45,3%), ainsi que ceux trouvés par Holdaway et al. [1999] entre un ADCP et un transmissomètre sur la rivière Mersey (différence moyenne entre 18 et 34%).

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 Rouen et Val-des-Leux (stations fluviales).

Data		Pente initiale / optimal (α)	Intersection (β)	MES [OBS – mg.L ⁻¹]	Corrélation		ME [mg.L ⁻¹]	MAE [mg.L ⁻¹]	MRE [%]	
					$MES_{ADCP} =$ αMES_{OBS} α	r				
ROUEN	ETIAGE	VE	0.60	18.52	10.7 – 58.2	1.00	0.79	-0.1	3.9	17.2
		ME	0.52	14.47	6.9 – 39.6	1.00	0.78	0.0	3.1	17.4
	CRUE	VE	0.80	29.93	9.9 – 73.3	1.00	0.89	0.2	5.0	16.6
		ME	0.62	19.96	6.3 – 44.1	1.00	0.86	-0.1	3.3	17.1
VAL DES LEUX	ETIAGE	VE	0.79	30.21	13.2 – 225.5	1.00	0.86	-2.0	15.9	26.0
		ME	0.84	34.13	14.9 – 144.4	1.00	0.87	-0.7	10.6	20.8
	CRUE	VE	0.75	27.40	7.2 – 80.7	1.00	0.77	-0.1	6.6	19.5
		ME	0.48	11.66	5.8 – 41.3	1.00	0.67	-0.3	3.1	16.1

Synthèse – Calibration hybride sur les stations du bouchon vaseux

La méthode hybride a été appliquée à l'ensemble des campagnes réalisées sur les stations de la TMZ (Tancarville et Fatouville). Les analyses statistiques effectuées pour quantifier les comparaisons de concentrations (calculées vs. *in situ*) sur chacune des campagnes sont présentées dans le tableau 3.

De manière générale, la pente (α) et le coefficient (r) de la droite de corrélation, obtenus à partir de la méthode d'inversion hybride, montrent une très bonne adéquation entre les concentrations en MES obtenues avec l'ADCP et celles obtenues avec l'OBS-3+. Les valeurs de ME positives (de l'ordre de 9,6 à 119,3 mg.L⁻¹) ou négatives (de l'ordre de -3,1 à -8,0 mg.L⁻¹) montrent une sur- ou sous-estimation des concentrations en MES, au vu des gammes observées *in situ* par l'OBS-3+, avec des différences normalisées de 28,0 à 38,1% et de 26,6 à 44,6%, respectivement pour Tancarville et Fatouville. Afin de juger de l'efficacité de la méthode hybride, ces erreurs peuvent être comparées aux nombreuses études traitant des méthodes théoriques d'inversion du signal acoustique. Nos écarts sont équivalents à ceux observés par Park et Lee [2016] sur trois estuaires coréens avec un ADCP Sentinel 600kHz (différences normalisées entre 8,3 et 45,4%) ainsi que ceux trouvés par Ha et al. [2011] dans la Baie de Mobile avec un ADCP RDI 600 kHz (surestimation à 7,3 mg.L⁻¹ et sous-estimation à 111 mg.L⁻¹, respectivement à 0,15 et 1 mètre au-dessus du fond, avec des différences normalisées entre 41,6 et 45,8%), pour des niveaux de concentrations de l'ordre du g.L⁻¹.

Tableau 3 : Tableau de synthèse des calibrations hybrides (pente α , l'intersection β et le diamètre optimum) entre l'indice IV et les concentrations MES_{OBS} avec leurs erreurs associées sur les sites de Tancarville et Fatouville (stations du bouchon vaseux).

Data			EMPIRIQUE		THEORIE	CORRELATION		MES [OBS – g.L ⁻¹]	ME [mg.L ⁻¹]	MAE [mg.L ⁻¹]	MRE [%]
			α	β	Diamètre Optimum [μ m]	a	r				
TANCARVILLE	ETIAGE	VE	0.49	18.57	35 – 67	1.10	0.81	0.033 – 2.9	119.3	411.9	38.1
		ME	0.52	18.56	49 – 96	0.86	0.92	0.012 – 2.2	-8.0	42.5	31.7
	CRUE	VE	0.15	0.05	37 – 100	1.09	0.78	0.048 – 3.5	36.4	161.3	35.4
		ME	0.53	18.70	45 – 86	0.90	0.87	0.013 – 1.3	-5.1	26.6	28.0
FATOUVILLE	ETAIGE	VE	0.42	12.85	45 -77	1.06	0.94	0.023 – 1.2	9.6	43.5	26.6
		ME	0.57	22.32	41 – 69	1.16	0.82	0.016 – 2.6	11.1	68.5	44.6
	CRUE	VE	0.30	8.02	43 – 77	0.96	0.86	0.055 – 3.7	10.7	357.7	36.2
		ME	0.25	5.84	38 – 58	1.05	0.88	0.078 – 4.5	-3.1	111.0	32.2

2 Profils de concentrations en MES issus de l'inversion acoustique

2.1 Validation des données ADCP et SYNAPSES

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 (0,5 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. L'analyse des trajectoires a permis de détecter des transects anormalement plus courts sur les campagnes réalisées en étiage, principalement en lien avec des interférences détectées entre l'acquisition de l'ADCP et du D-GPS. Trois campagnes ont dû être écartées de l'analyse en raison d'un trop grand nombre de transects défectueux (Val des Leux en Etiage/VE et Tancarville en Etiage/ME – Figure 7) ou en raison d'un nombre insuffisant de transects ADCP (Fatouville en Etiage/VE).

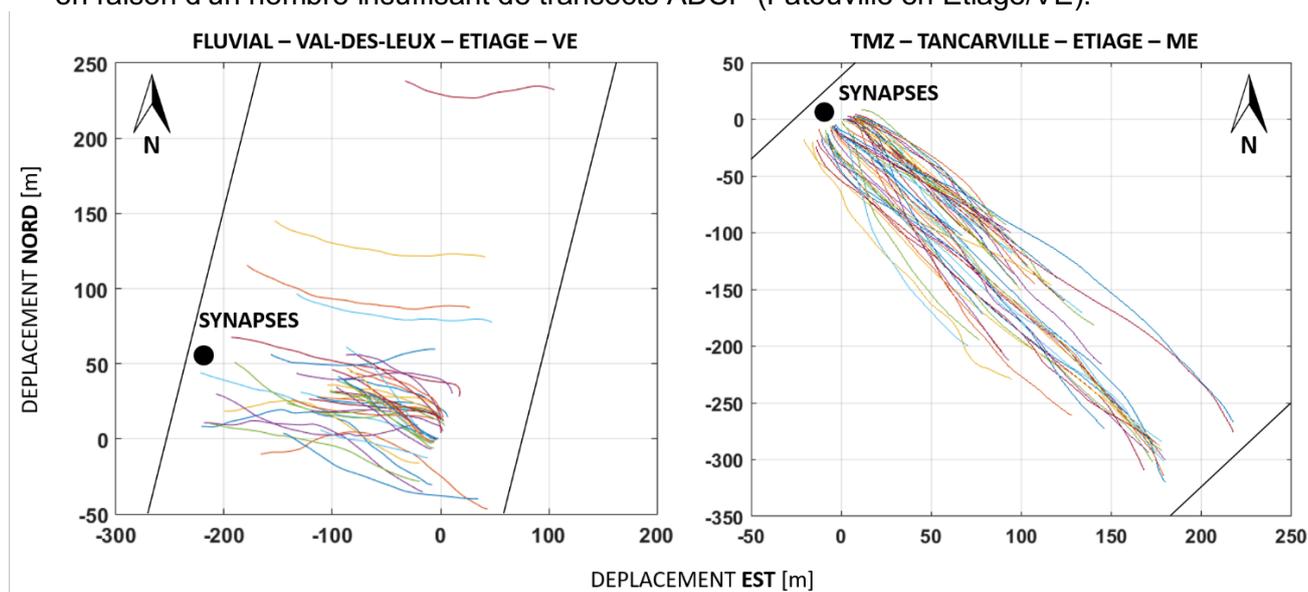


Figure 7 : Trajectoires du bateau enregistrées par l'ADCP sur les campagnes réalisées à Val-des-Leux (condition d'étiage et de VE) et à Tancarville (condition d'étiage et de ME).

Traitement des données haute-fréquence SYNAPSES

Les concentrations ponctuelles en MES du réseau SYNAPSES sont obtenues à partir des mesures de turbidité converties à l'aide des coefficients de calibration spécifiques à chaque station, déterminés dans un précédent rapport [Druine et al., 2016]. Deux campagnes sont écartées de l'analyse de la représentativité des stations en raison d'un manque de données sur le réseau SYNAPSES (Rouen en Crue/ME) ou en raison de données aberrantes (Fatouville surface en Etiage/ME – blocage de la sonde) au cours de cette période.



2.2 Concentrations en MES sur la section transversale ciblée

Les données d'intensité acoustique rétrodiffusée acquises à partir de l'ADCP sont corrigées des atténuations liées à l'eau (α_w) et aux sédiments (α_s), puis étalonnées en concentration en MES à partir des données issues des profils verticaux (OBS-3+/LISST). La calibration empirique ou hybride permet ainsi de convertir l'ensemble des transects acoustiques acquis à partir l'ADCP en concentration en MES. Deux exemples de transects sont illustrés figure 8 suivant (i) le compartiment estuarien (fluvial et bouchon vaseux) et (ii) les périodes caractéristiques du cycle de marée, dans le but d'évaluer la répartition des concentrations en MES sur la section. De manière générale, en période de flot/jusant, les stations fluviales sont caractérisées par des concentrations plus importantes sur la rive opposée à la station SYNAPSES (rive gauche pour Rouen et rive droite pour Val-des-Leux – concentrations supérieures à $0,1 \text{ g.L}^{-1}$), tandis que les stations du bouchon vaseux présentent des concentrations élevées principalement au fond de la colonne d'eau (concentrations supérieures à 5 g.L^{-1}).

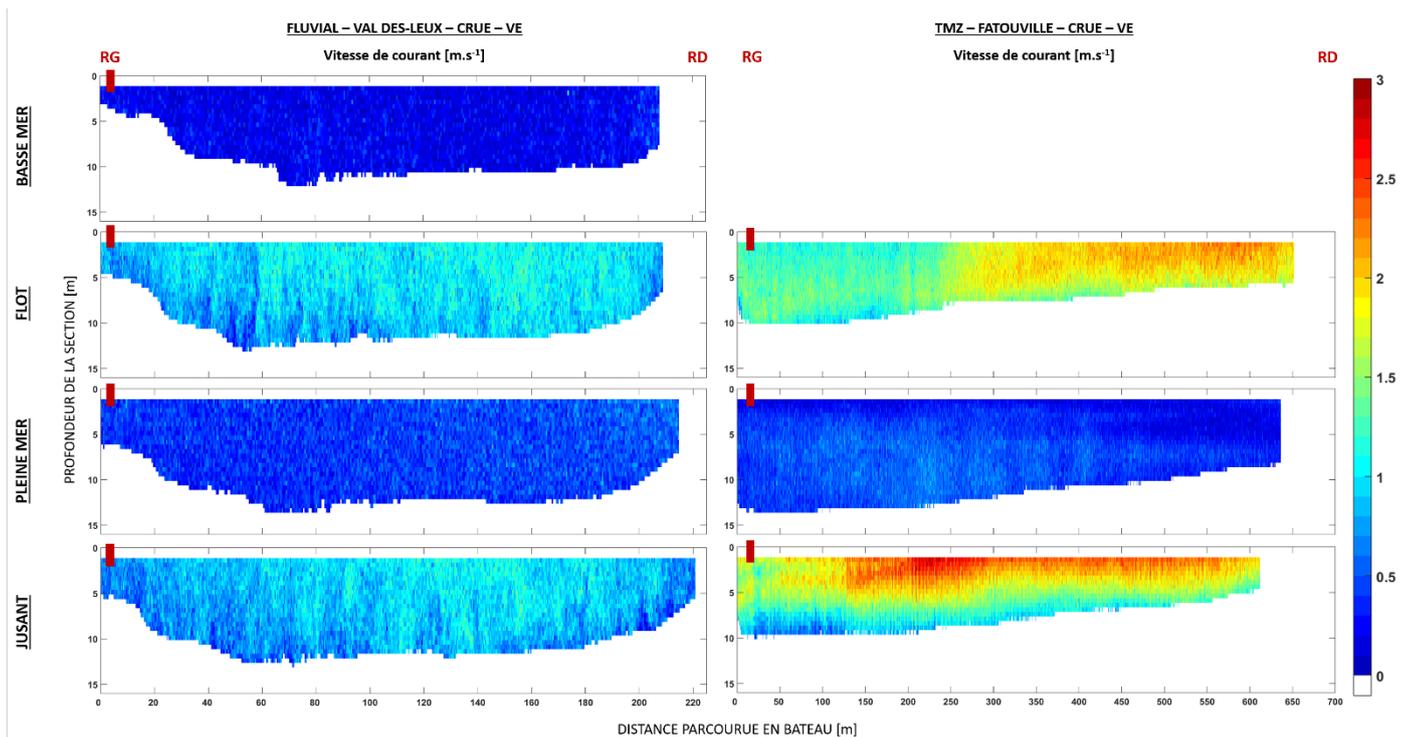


Figure 8 : Répartition des concentrations en MES [g.L^{-1}] estimées à partir de l'ADCP 600kHz sur la section transversale, sélectionnée suivant (i) le compartiment fluvial (Val-des-Leux) ou TMZ (Fatouville) et (ii) les périodes caractéristiques du cycle de marée, à savoir la basse mer, le flot, la pleine mer et le jusant. Le rectangle rouge marque l'emplacement de la station SYNAPSES.

CHAPITRE 3 – RESULTATS

Les données acquises grâce aux sondes YSI du réseau SYNAPSES constituent une précieuse source d'information à des fréquences d'acquisition particulièrement élevées et sur de longues périodes temporelles (comparativement aux classiques campagnes de prélèvements). En revanche, une limitation de ces mesures *in situ* en estuaire est l'unicité du point de mesure sur la section. L'écart entre la mesure ponctuelle du réseau par rapport à l'évolution moyenne du paramètre mesuré sur la section peut alors générer une importante source d'incertitude [Horowitz, 2008 ; Lewis et Eads, 2008]. Afin d'évaluer la représentativité du réseau SYNAPSES, les concentrations en MES de chacune des stations SYNAPSES sont comparées à celles acquises par l'ADCP de l'échelle spatiale locale (proximité de la station) à globale (section de l'estuaire). Les analyses et les conclusions sur le site de Rouen serviront d'exemples et seront appliquées aux autres sites.

1 Site de ROUEN

Moyenne par boîte proche de la station SYNAPSES et par rive considérée

Des concentrations moyennes sont estimées (i) selon 3 boîtes localisées à proximité de la station SYNAPSES, suivant 1 cellule, 3 cellules verticales et une boîte par 3x3 cellules (Figures 9 et 10 – a) et (ii) selon 3 boîtes de largeurs égales représentant la Rive Droite (RD – ligne verte), le Centre (C – ligne bleue) et la Rive Gauche (RG – ligne jaune) (Figures 9 et 10 – b).

Les concentrations moyennes de MES estimées sur les boîtes proche de la station de mesure présentent une bonne concordance avec les mesures du réseau uniquement sur la période de crue. Les périodes d'étiage ainsi que les périodes de flot mettent en évidence une différence entre les mesures (MES_{ADCP} vs. $MES_{SYNAPSES}$) d'environ 50% (Figures 9 et 10 – a). Ce biais pourrait être lié à la calibration de l'ADCP réalisée à partir des mesures de l'OBS-3+ (i.e. surestimation des concentrations en MES). Concernant la section ciblée (Figures 9 et 10 – b), les concentrations en surface du réseau SYNAPSES (croix rouges) présentent une bonne concordance avec les concentrations moyennes observées sur la rive associée, à savoir la rive droite (RD – courbe verte), mais sont progressivement inférieures aux concentrations moyennes observées *in situ* par l'ADCP en se rapprochant de la rive opposée (RG – courbe bleue).



Moyenne horizontale en surface et au fond

Les concentrations en MES du réseau SYNAPSES sont ensuite comparées à des moyennes des concentrations en MES à partir de deux transects horizontaux sélectionnés (i) à 1m sous la surface (ligne bleue) et (i) à 1m au-dessus du fond (ligne bordeaux) (Figures 9 et 10 – c).

Quel que soit les conditions hydrodynamiques (débit et marée), les concentrations en surface du réseau SYNAPSES (croix rouges) sous-estiment constamment ($\approx 0,01 \text{ mg.L}^{-1}$) les concentrations moyennes horizontales de surface observées par l'ADCP, mais suivent tout de même les grandes tendances de variations des concentrations en MES observées sur le cycle de marée. Néanmoins, la hausse des concentrations en MES au moment du flot n'est pas perçue par la sonde du réseau, sur chacune des campagnes réalisées.

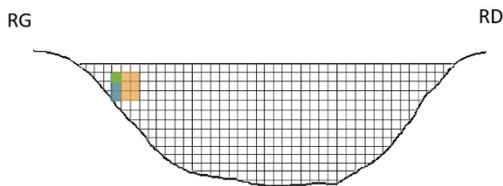
Moyenne globale sur la section

En milieu fluvial, l'une des premières hypothèses suppose que les concentrations ponctuelles soient représentatives de toute la section, ce qui n'est pas forcément le cas en milieu estuarien (Figures 9 et 10 – d). Quel que soit les conditions hydrodynamiques (débit et marée), les concentrations en MES observées sur la station de Rouen en surface (représentées par des croix oranges) sous-estiment, la plupart du temps, les concentrations moyennes en MES (points noirs) observées par l'ADCP sur l'ensemble de la section et du cycle de marée (de $\approx 0,01-0,03 \text{ g.L}^{-1}$).

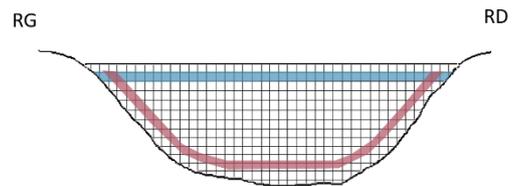


DONNÉES SÉLECTIONNÉES PAR TRANSECT ADCP

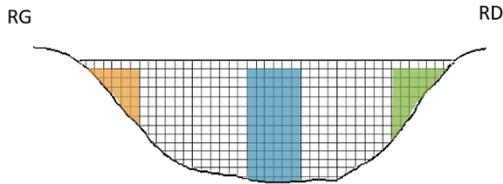
a) Moyenne à proximité de la station SYNAPSES



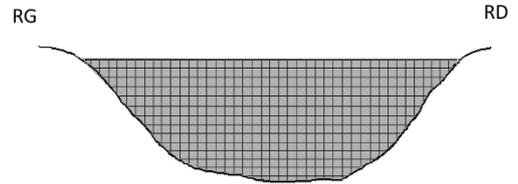
c) Moyenne sur un transect horizontal



b) Moyenne sur la rive considérée

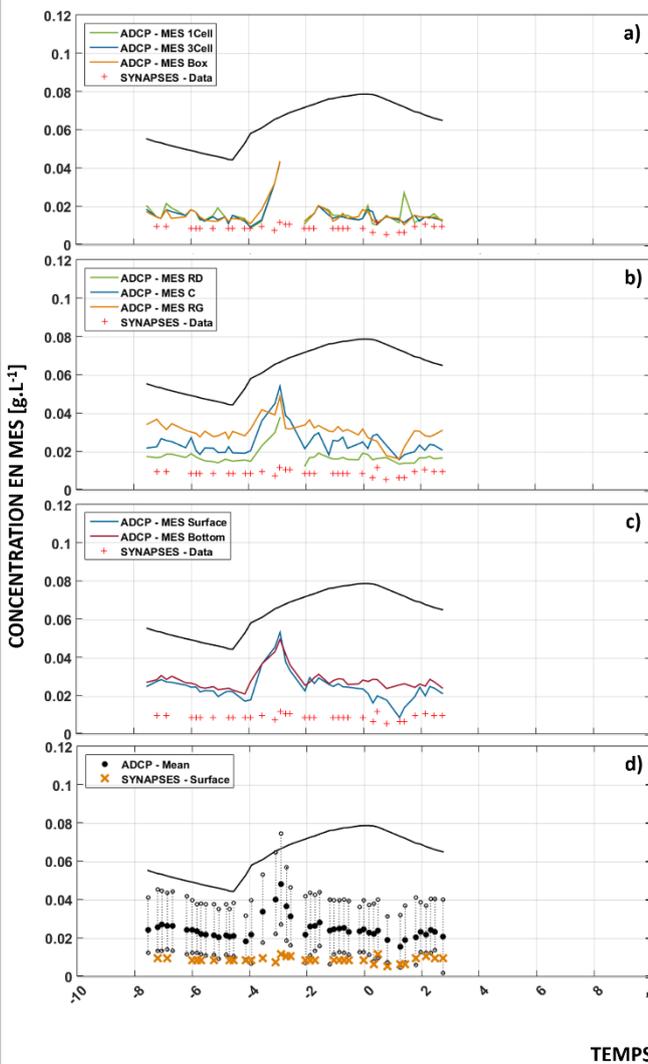


d) Moyenne sur la section



FLUVIAL – ROUEN – PK 243

A ETIAGE – VE



B ETIAGE – ME

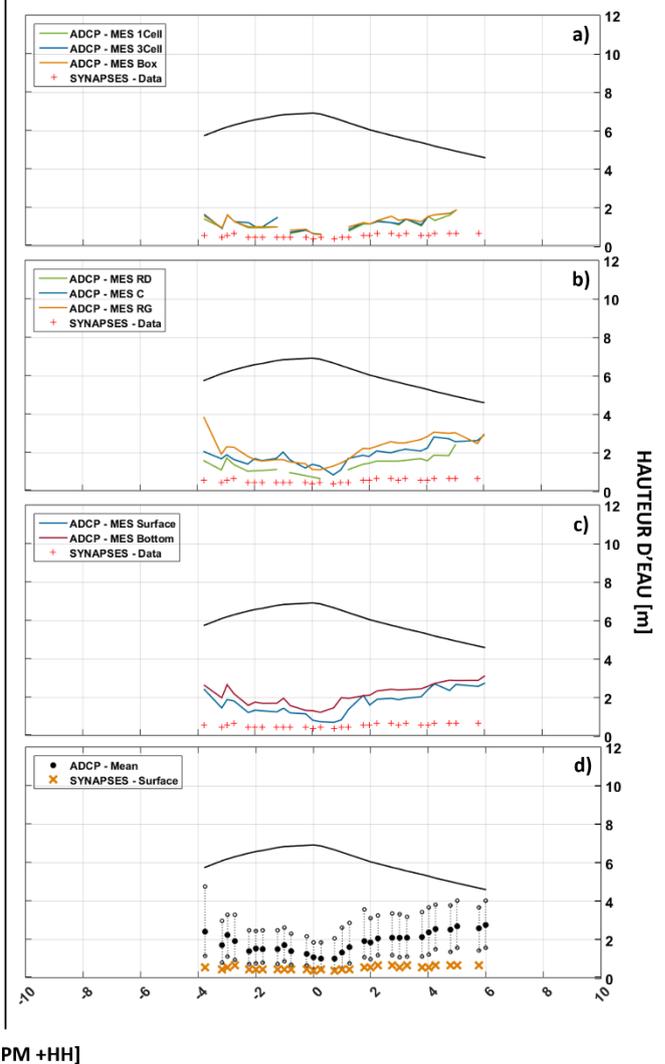


Figure 9 : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes – (a) à partir de boîtes proches de la mesure ponctuelle (1 cellule, 3 cellules et une boîte 3x3) – (b) sur la rive considérée (RD : rive droite, C : centre et RG : rive gauche) – (c) sur les profils horizontaux (surface ou fond) et (d) sur la section (avec en point noir, les concentrations moyennes et en ligne pointillée, les percentiles 2,5 et 97,5 % obtenus par transects ADCP). Exemples pris sur les sites de Rouen en période : (A) d'étiage/VE et (B) d'étiage/ME.



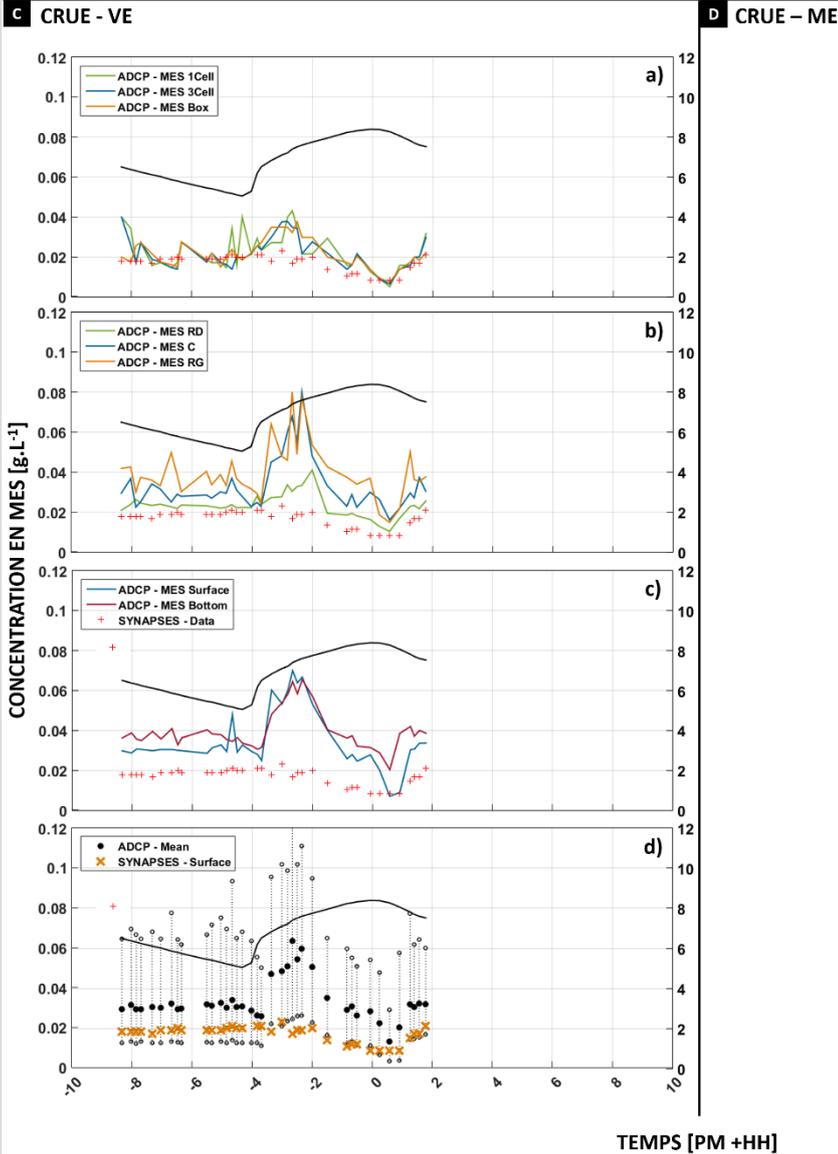


Figure 10 : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes – (a) à partir de boîtes proches de la mesure ponctuelle (1 cellule, 3 cellules et une boîte 3x3) – (b) sur la rive considérée (RD : rive droite, C : centre et RG : rive gauche) – (c) sur les profils horizontaux (surface ou fond) et (d) sur la section (avec en point noir, les concentrations moyennes et en ligne pointillée, les percentiles 2,5 et 97,5 % obtenus par transects ADCP). Exemple pris sur les sites de Rouen en période : (C) de crue/VE et (D) de crue/ME.



Synthèse – Représentativité de la station de ROUEN

L'analyse des concentrations en MES à partir des mesures ADCP met uniquement en évidence une variabilité transversale sur la section ciblée. En effet, les concentrations moyennes observées sur la rive droite (RD – courbe verte – entre 0,01 et 0,03 g.L⁻¹) augmentent progressivement en se rapprochant de la rive opposée (RG – courbe jaune – entre 0,02 et 0,08 g.L⁻¹). Avec des concentrations moyennes en MES identiques en surface et au fond (aucune variabilité verticale), l'implantation d'une seule et unique sonde de turbidité en surface est amplement suffisant sur la station de Rouen.

L'observation d'une variabilité transversale pose la question de la représentativité des concentrations en MES issues de la station SYNAPSES vis-à-vis de la section ciblée. Afin d'établir un lien entre les mesures ponctuelles du réseau et celles sur la section, différentes corrélations sont réalisées entre les concentrations SYNAPSES et les concentrations moyennes observées par l'ADCP de l'échelle spatiale globale (section de l'estuaire) à locale (à proximité de la station). Les corrélations sont réalisées avec l'ensemble des données ADCP acquises sur le site de Rouen (toutes conditions hydrologiques et hydrodynamiques confondues) dans le but de déceler une tendance générale propre au site de mesure. La figure 11 synthétise les grandes tendances observées sur la station de Rouen, en comparant les liens entre les concentrations ponctuelles SYNAPSES et celles de l'ADCP à l'aide de la pente de la droite (a), le coefficient de corrélation (r) et les erreurs associées (ME : 'Mean Error' ; MAE : 'Mean Absolute Error' ; MRE : 'Mean Relative Error').

Des corrélations correctes peuvent être observées sur les sites de Rouen, avec un coefficient de corrélation (r) autour de 0,60-0,77. A l'inverse, les valeurs de pente (a) obtenues montrent une forte sous-estimation des concentrations en MES du réseau SYNAPSES par rapport aux concentrations en MES observées sur la section. En effet, les concentrations en MES sur le site de Rouen (surface) sous-estiment (i) de 1,4 à 1,5 fois les concentrations moyennes mesurées à proximité de la station (Figure 11 – a); (ii) de 2,2 à 2,7 fois les concentrations moyennes en MES dans le chenal et la rive opposée (Figure 11 – b) et (iii) d'environ 2,2 fois les concentrations moyennes observées sur le transect horizontal de surface (Figure 11 – c) et la section globale (Figure 11 – d). Néanmoins, avec des coefficients de corrélation bien marqués, l'application de ces différents coefficients sur les mesures *in situ* du réseau SYNAPSES, permet (i) d'estimer une dynamique moyenne des concentrations en MES sur la section transversale et ainsi (ii) de compenser la mauvaise représentativité de la station à Rouen.



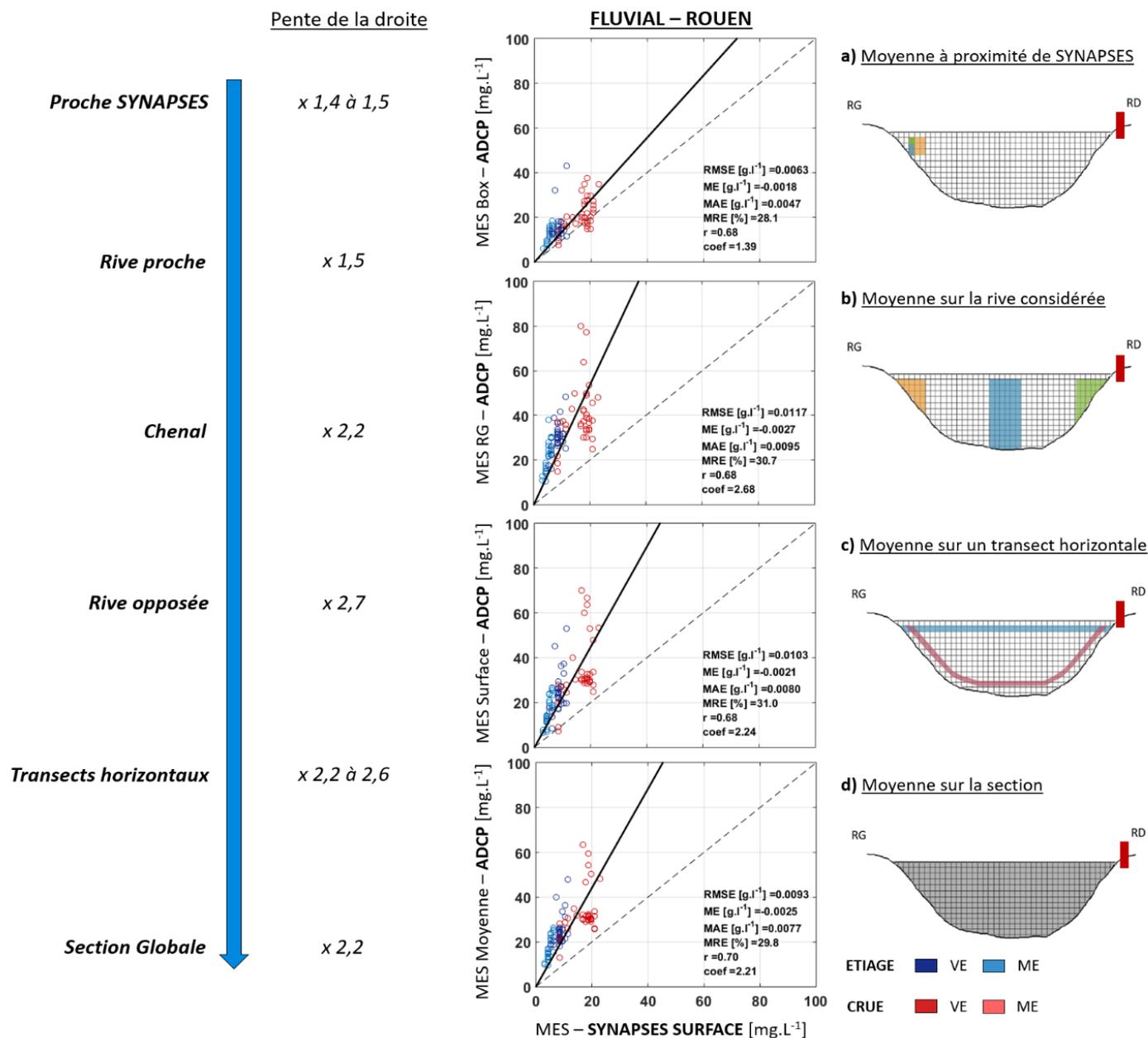


Figure 11 : Corrélations établies sur le site de Rouen entre les mesures de concentrations ponctuelles de MES du réseau SYNAPSES et les concentrations moyennes de MES issues de l'ADCP – (a) à partir de boîtes proches de la mesure ponctuelle (boîte 3x3) – (b) sur la rive considérée (RD : rive droite) – (c) sur les profils horizontaux (surface) et (d) sur la section globale.



2 Site de VAL DES LEUX

Moyenne par boîte proche de la station SYNAPSES et par rive considérée

A l'exception de la campagne d'étiage, les concentrations moyennes estimées sur les boîtes proches de la station de mesure en période de crue, coïncident quasiment avec les mesures du réseau sur l'ensemble du cycle de marée (Figures 12 et 13 – a).

Sur la section (Figures 12 et 13 – b), les concentrations en surface du réseau SYNAPSES (croix rouges) présentent une bonne concordance avec les concentrations moyennes et les tendances observées sur la rive associée, à savoir la rive gauche (RG – courbe bleue), mais sont progressivement inférieures aux concentrations moyennes observées *in situ* par l'ADCP en se rapprochant de la rive opposée (quasiment un facteur 4 en étiage et 2 en crue ; RD – courbe verte).

Moyenne horizontale en surface et au fond

Quel que soit les conditions hydrodynamiques (débit et marée), les concentrations en surface du réseau SYNAPSES (croix rouges) sous-estiment constamment ($\approx 0,01$ à $0,02 \text{ mg.L}^{-1}$) les concentrations moyennes horizontales de surface observées par l'ADCP (Figures 12 et 13 – c). Néanmoins, les mesures acquises sur le cycle de marée mettent en évidence une variabilité transversale des concentrations en MES, à l'exception d'une campagne douteuse en période d'étiage et de ME.

Moyenne globale sur la section

A l'image de la station de Rouen, les concentrations en MES observées sur la station de Val des Leux en surface (représentées par des croix oranges – Figures 12 et 13 – d) sous-estiment les concentrations moyennes en MES (points noirs) observées par l'ADCP sur l'ensemble de la section et du cycle de marée (de $\approx 0,01$ - $0,06 \text{ g.L}^{-1}$).



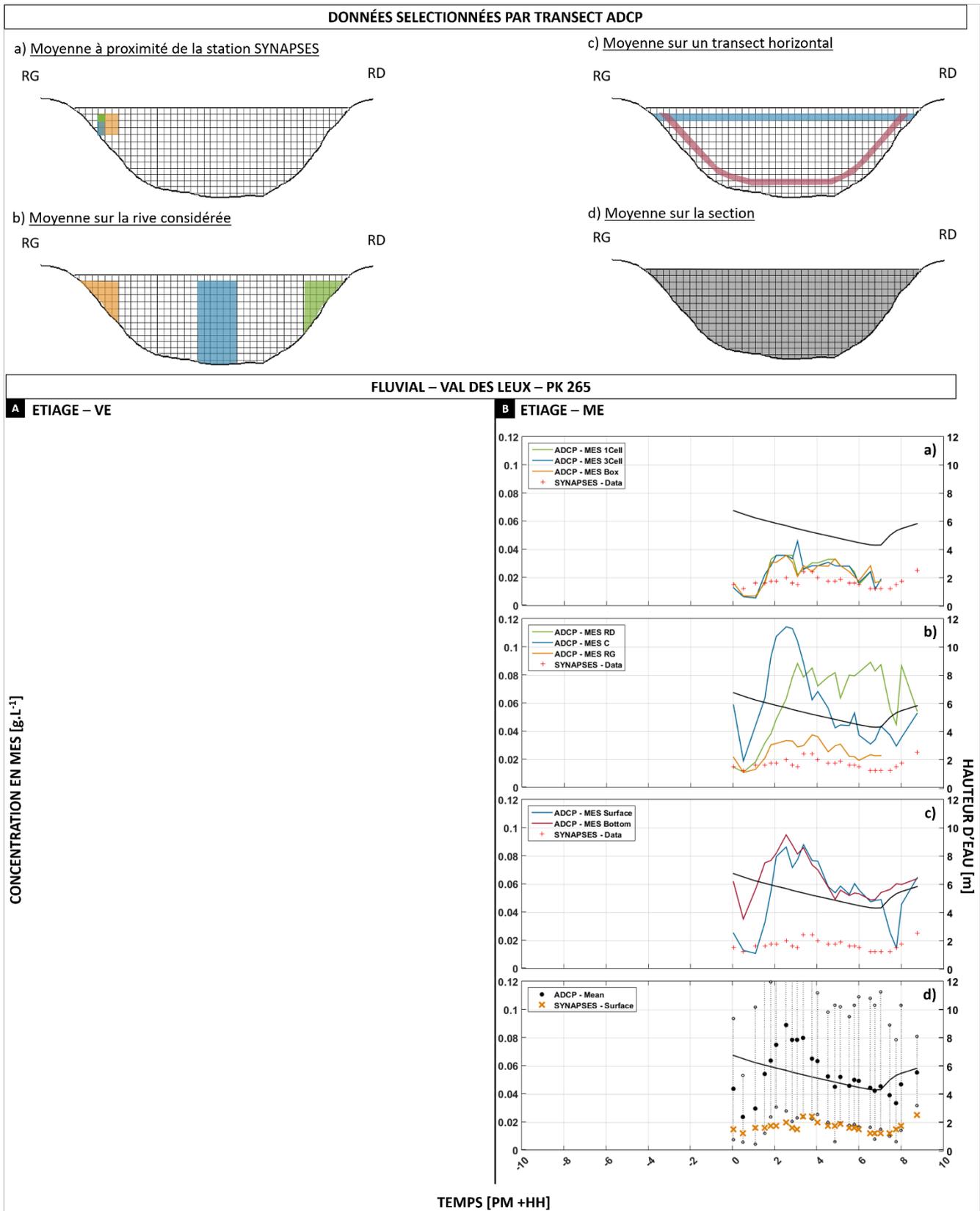


Figure 12 : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes – (a) sur la section (avec en point noir, les concentrations moyennes et en ligne pointillée, les percentiles 2,5 et 97,5 % obtenus par transects ADCP) – (b) sur les profils horizontaux (surface ou fond) – (c) sur la rive considérée (RD : rive droite, C : centre et RG : rive gauche) et (d) à partir de boîtes proches de la mesure ponctuelle (1 cellule, 3 cellules et une boîte 3x3). Exemple pris sur les sites de Val des Leux en période : (A) d'étiage/VE et (B) d'étiage/ME.

FLUVIAL – VAL DES LEUX – PK 265

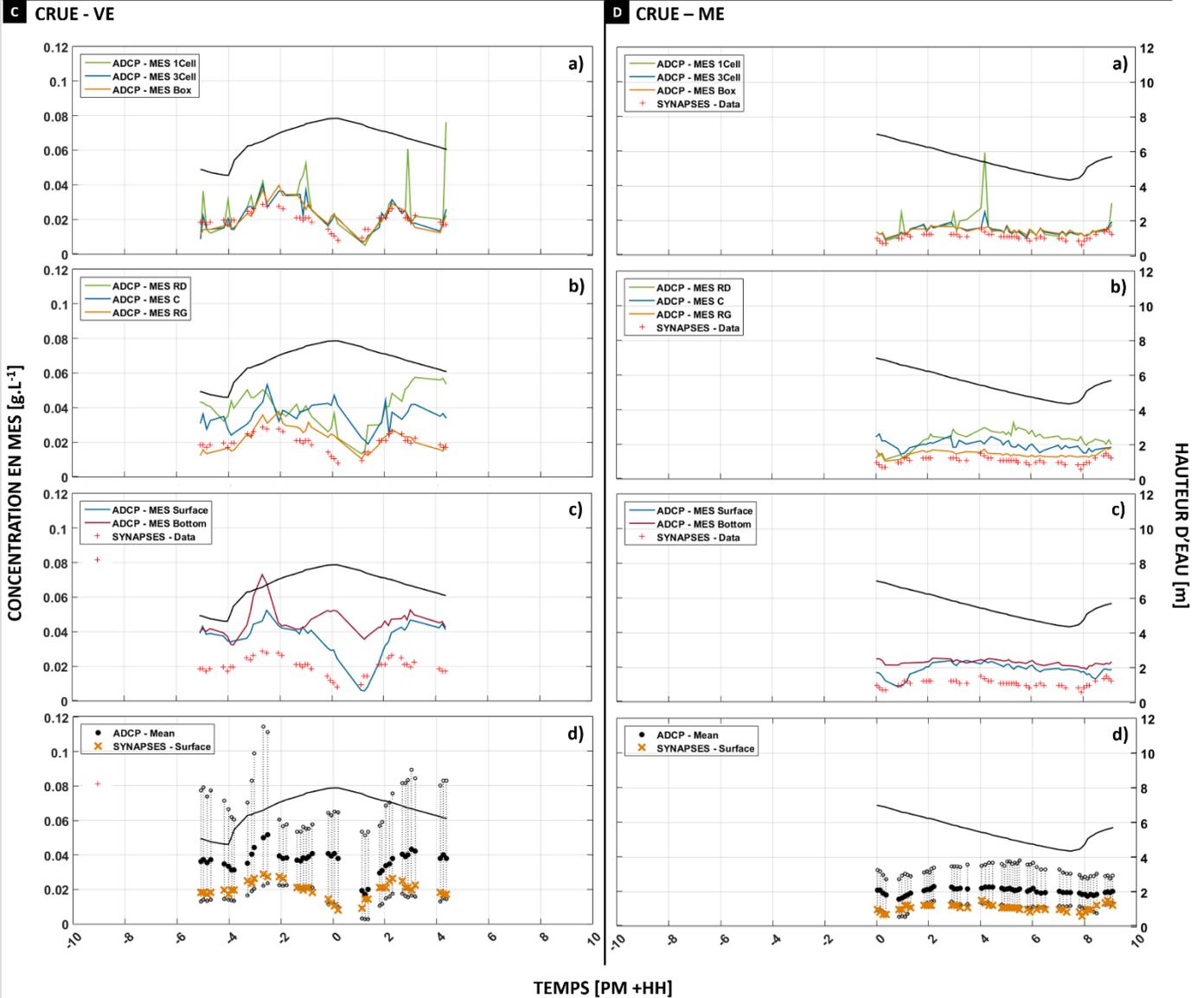


Figure 13 : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes – (a) sur la section (avec en point noir, les concentrations moyennes et en ligne pointillée, les percentiles 2,5 et 97,5 % obtenus par transects ADCP) – (b) sur les profils horizontaux (surface ou fond) – (c) sur la rive considérée (RD : rive droite, C : centre et RG : rive gauche) et (d) à partir de boîtes proches de la mesure ponctuelle (1 cellule, 3 cellules et une boîte 3x3). Exemple pris sur les sites de Val des Leux en période : (C) de crue/VE et (D) de crue/ME.



Synthèse – Représentativité de la station de VAL DES LEUX

L'analyse des transects ADCP sur la section de Val des Leux met en évidence une variabilité transversale des concentrations en MES. En effet, les concentrations moyennes observées sur la rive gauche (RG – courbe jaune – entre 0,02 et 0,04 g.L⁻¹) augmentent progressivement en se rapprochant de la rive opposée (RD – courbe verte – entre 0,02 et 0,09 g.L⁻¹). A cette variabilité transversale, une variabilité verticale peut être ajoutée uniquement en période de flot et de jusant (observations faites en condition d'étiage/ME et de crue/VE – Figure 12 et 13). Malgré une variabilité verticale marquée sur certaines périodes du cycle de marée, l'implantation d'une seule sonde de turbidité en surface reste justifiée en raison de la faible profondeur d'eau sur la rive gauche à Val des Leux, favorisant une homogénéisation de la colonne d'eau.

Afin de juger de la représentativité de la station de Val des Leux, des corrélations sont réalisées et illustrées sur la figure 14 avec des coefficients de corrélation (r) autour de 0,49-0,73. A l'image du site de Rouen, les valeurs de pente (α) obtenues montrent une forte sous-estimation des concentrations en MES du réseau SYNAPSES par rapport aux concentrations en MES observées sur la section. Les estimations mettent en évidence des concentrations en MES (surface) du réseau sous-estimées (*i*) de 1,2 à 1,3 vis-à-vis des concentrations moyennes proches de la station SYNAPSES (Figure 14 – **a et b**) et (*ii*) de 2,5 fois par rapport aux concentrations moyennes sur la section, dans le chenal ainsi que sur la rive opposée (Figure 14 – **b, c et d**). Même si la dynamique des MES est correctement enregistrée, la station de Val-des-Leux est quantitativement peu représentative des concentrations en MES observées sur la section transversale. Une correction des concentrations en MES du réseau SYNAPSES à l'aide des coefficients précédents est nécessaire pour compenser la mauvaise représentativité quantitative de la station.



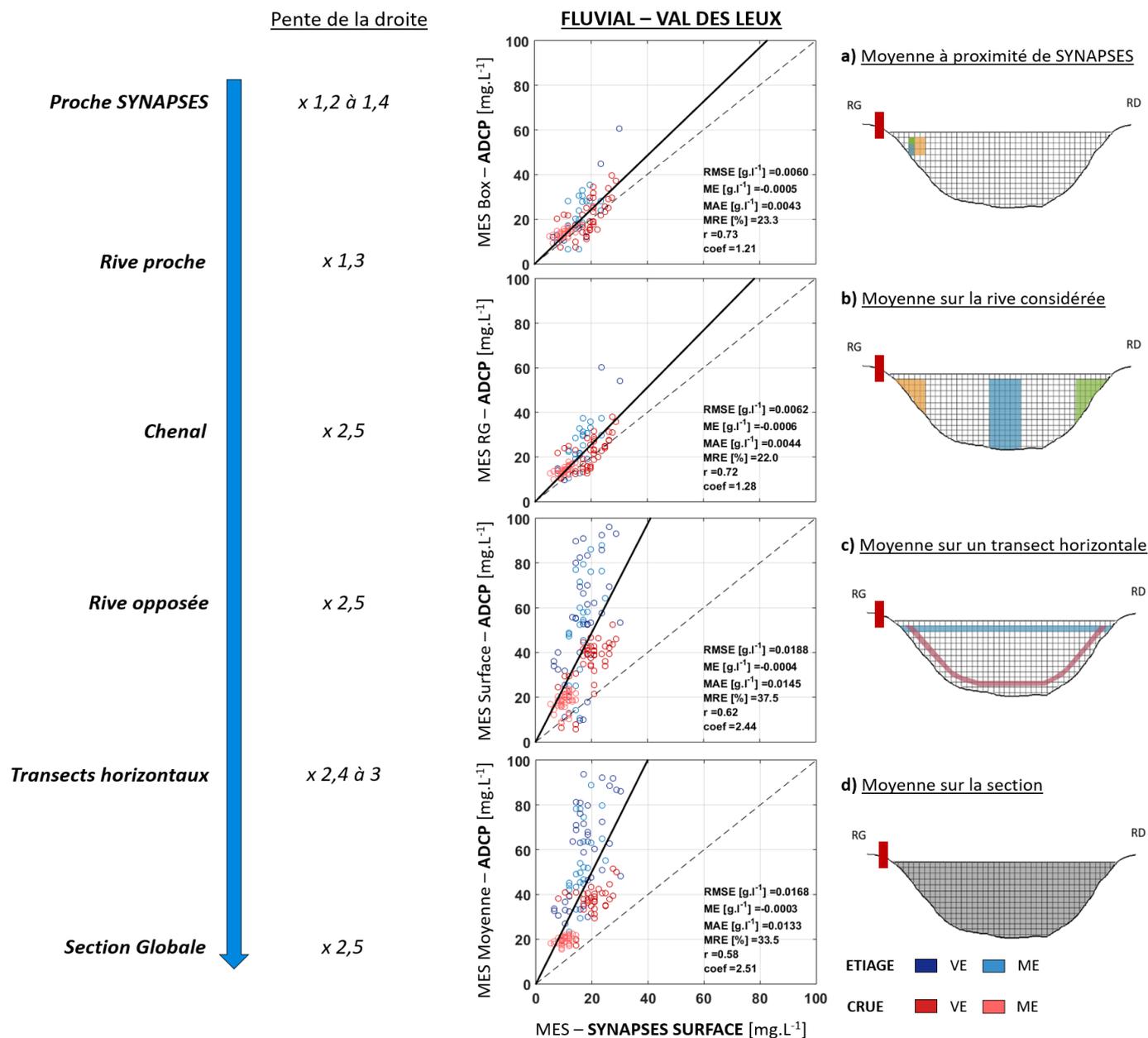


Figure 14 : Corrélations établies sur le site de Val des Leux entre les mesures de concentrations ponctuelles de MES du réseau SYNAPSES et les concentrations moyennes de MES issues de l'ADCP – (a) à partir de boîtes proches de la mesure ponctuelle (boîte 3x3) – (b) sur la rive considérée (RG : rive gauche) – (c) sur les profils horizontaux (surface) et (d) sur la section globale.



3 Site de TANCARVILLE

Moyenne par boîte proche de la station SYNAPSES et par rive considérée

La comparaison des concentrations du réseau SYNAPSES avec celles estimées par l'ADCP sur les boîtes proches de la station se distingue suivant les concentrations en MES acquises par le réseau SYNAPSES en surface et au fond (croix rouges et noires respectivement – Figure 15 et 16 – a). Les concentrations en MES de la sonde du réseau en surface et au fond présentent alors de bonnes concordances vis-à-vis des concentrations moyennes en MES estimées par l'ADCP à proximité de la station de Tancarville. Seule exception faite sur une campagne en période de crue et de VE où les faibles concentrations en MES perçue par la sonde du réseau (au fond) ne correspondent pas aux observations faites à partir de l'ADCP (Figure 16 – a). Concernant les différentes rives de l'estuaire (RD/C/RG – Figure 15 et 16 – b), les concentrations moyennes estimées par l'ADCP montrent peu de variabilité transversale. Les concentrations en MES ponctuelles du réseau sur le site de Tancarville (moyenne surface/fond) suivent les grandes tendances observées sur le cycle de marée à partir des concentrations moyennes de l'ADCP.

Moyenne horizontale en surface et au fond

Quel que soit les conditions hydrodynamiques (débit et marée), les concentrations en MES du réseau à la fois en surface (croix rouges) et au fond (croix noires) correspondent relativement aux observations réalisées par l'ADCP en surface et au fond respectivement, à l'exception d'une campagne en période de crue et de VE (Figure 15 et 16 – c). Les différences de concentrations moyennes en MES entre la surface mettent en évidence une forte variabilité verticale (0,02 à 2 g.L⁻¹ en surface contre 0,05 à 3,5 g.L⁻¹ au fond).

Moyenne globale sur la section

A l'image des stations fluviales, les concentrations en MES observées sur la station de Tancarville, en surface ou au fond (représentées par des croix oranges et vertes respectivement) sous-estiment, une nouvelle fois, les concentrations moyennes en MES (points noirs) observées par l'ADCP sur l'ensemble de la section et du cycle de marée (de ≈0.1-0,5 g.L⁻¹ – Figure 15 et 16 – d).



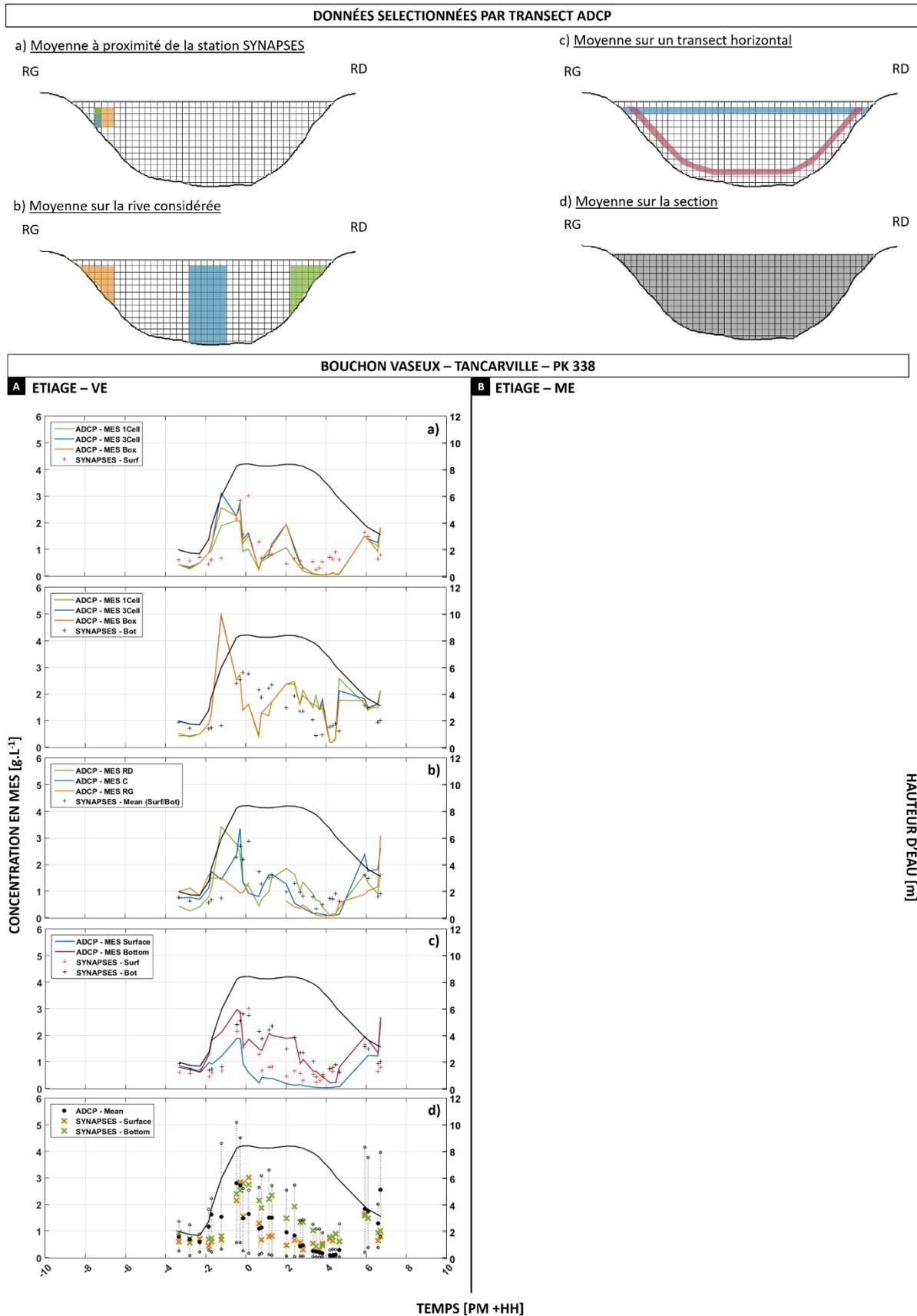


Figure 15 : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes – (a) sur la section (avec en point noir, les concentrations moyennes et en ligne pointillée, les percentiles 2,5 et 97,5 % obtenus par transects ADCP) – (b) sur les profils horizontaux (surface ou fond) – (c) sur la rive considérée (RD : rive droite, C : centre et RG : rive gauche) et (d) à partir de boîtes proches de la mesure ponctuelle (1 cellule, 3 cellules et une boîte 3x3). Exemple pris sur les sites de Tancarville en période : (A) d'étiage/VE et (B) d'étiage/ME.



BOUCHON VASEUX – TANCARVILLE – PK 338

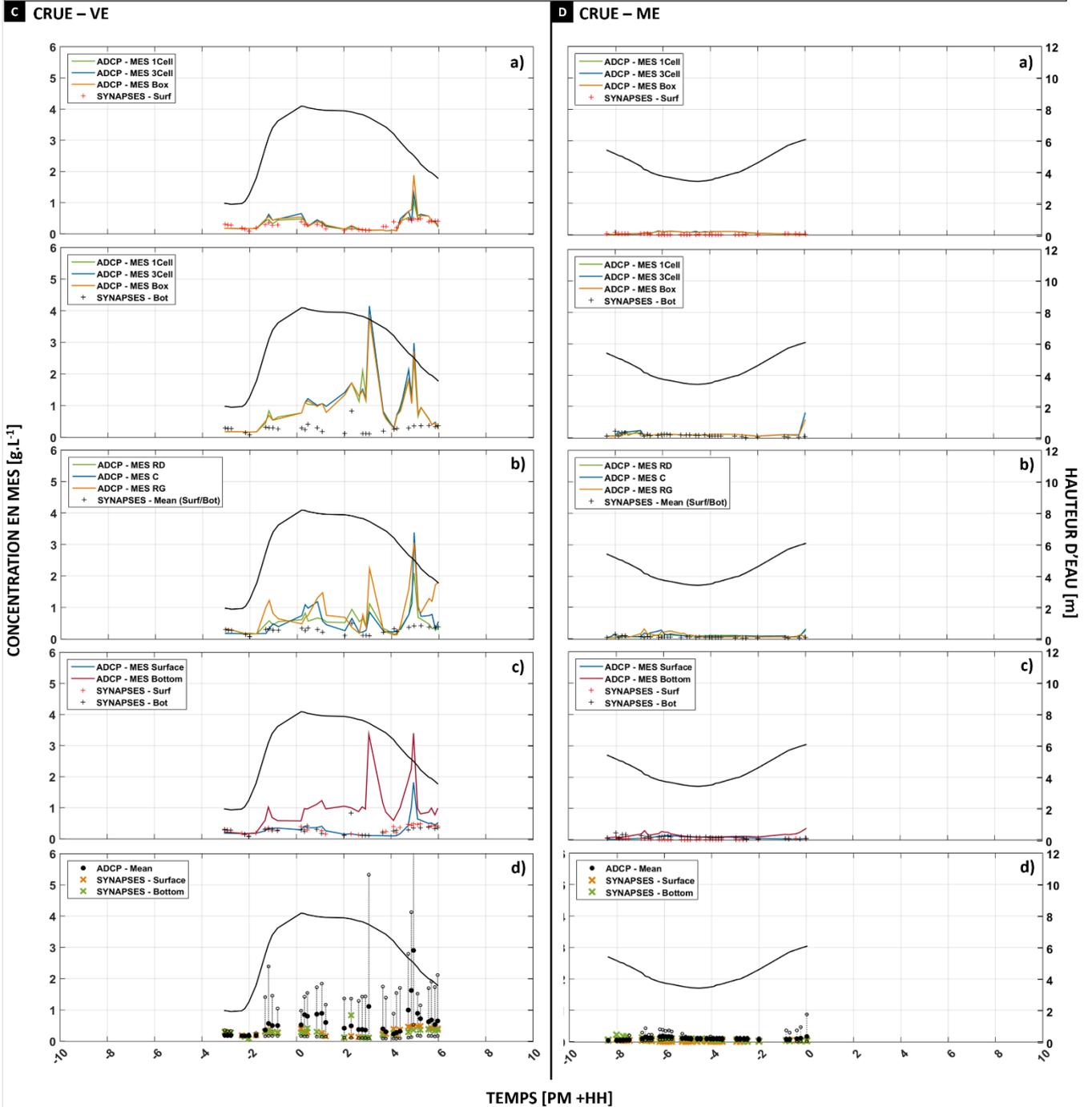


Figure 16 : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes – (a) sur la section (avec en point noir, les concentrations moyennes et en ligne pointillée, les percentiles 2,5 et 97,5 % obtenus par transects ADCP) – (b) sur les profils horizontaux (surface ou fond) – (c) sur la rive considérée (RD : rive droite, C : centre et RG : rive gauche) et (d) à partir de boîtes proches de la mesure ponctuelle (1 cellule, 3 cellules et une boîte 3x3). Exemple pris sur les sites de Tancarville en période : (C) de crue/VE et (D) de crue/ME.

Synthèse – Représentativité de la station de TANCARVILLE

L'analyse des transects ADCP sur la section de Tancarville met principalement en évidence une variabilité verticale (surface/fond). Les concentrations moyennes observées à la surface (courbe bleue – entre 0,02 et 1,9 g.L⁻¹ – Figure 15 et 16) augmentent progressivement vers le fond de la colonne d'eau (courbe rose – entre 0,02 et 3,5 g.L⁻¹ – Figure 15 et 16). Ces forts gradients de concentrations justifient l'implantation d'une sonde de surface et de fond sur ce site. A l'inverse, les concentrations moyennes de MES identiques de la rive gauche vers la rive droite traduisent une absence de variabilité transversale sur le cycle tidal.

A l'image des stations fluviales, plusieurs corrélations sont réalisées et illustrées sur la figure 17 dans le but de juger de la représentativité de la station de Tancarville sur la section ciblée. La pente (a) des droites de corrélation, proche de 1, montre une très bonne adéquation entre les mesures de concentrations obtenues à partir de SYNAPSES et de l'ADCP sur les sites de Tancarville. Cependant, suivant l'échelle spatiale étudiée, les coefficients de corrélation (r) semblent extrêmement variables verticalement (surface/fond) (Figure 17), probablement en lien avec les forts gradients de concentrations dominants dans la zone du bouchon vaseux. Ces tendances permettent ainsi de juger des limites de représentativité des mesures ponctuelles du réseau SYNAPSES sur la section de l'estuaire.

Les concentrations de MES du réseau sur le site de Tancarville (moyenne surface/fond) montrent une très bonne corrélation avec les concentrations moyennes observées sur la section globale et sur la rive proche de la station (pente a variant de 1 à 1,03 et coefficient r autour de 0,70-0,76 – Figure 17 – **a, b et d**). Malgré des pentes (a) proches de 1, les coefficients de corrélations deviennent médiocres avec l'éloignement à la station SYNAPSES, passant d'un coefficient de corrélation (r) de 0,70 proche de SYNAPSES à 0,37 sur la rive opposée (Figure 17 – **b**). Sur les transects horizontaux, les corrélations montrent respectivement une surestimation en surface et une sous-estimation au fond des concentrations en MES du réseau SYNAPSES par rapport aux concentrations moyennes en MES observées par l'ADCP sur la section (Figure 17 – **c**).

En conclusion, avec une pente (a) proches de 1, l'utilisation d'une moyenne des concentrations en MES entre les données de surface et celles de fond du réseau SYNAPSES donne une bonne représentativité spatiale de la dynamique moyenne des MES sur la section transversale du site de Tancarville.



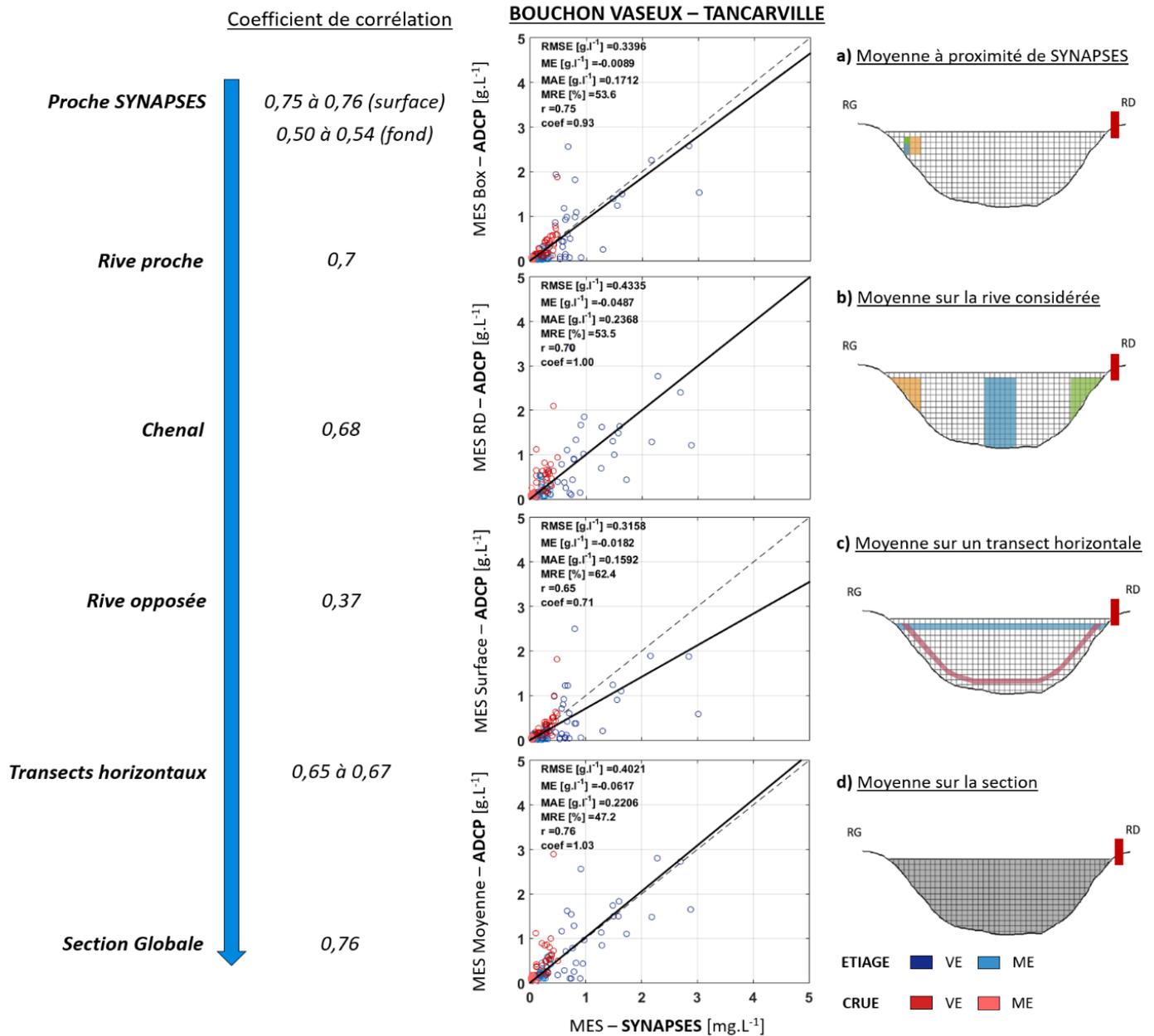


Figure 17 : Corrélations établies sur le site de Tancarville entre les mesures de concentrations ponctuelles de MES du réseau SYNAPSES et les concentrations moyennes de MES issues de l'ADCP – (a) à partir de boîtes proches de la mesure ponctuelle (boîte 3x3) – (b) sur la rive considérée (RD : rive droite) – (c) sur les profils horizontaux (surface) et (d) sur la section globale.



4 Site de FATOUVILLE

Moyenne par boîte proche de la station SYNAPSES et par rive considérée

Les concentrations en MES de la sonde du réseau en surface présentent une bonne concordance vis-à-vis des concentrations moyennes en MES estimées par l'ADCP à proximité de la station de Fatouville – Figure 18 et 19 – **a**. Seule exception sur la campagne en période de crue et de VE, la forte hausse des concentrations en MES au moment du flot perçue par la sonde du réseau ne correspond pas aux observations faites à partir de l'ADCP. Les concentrations en MES, observées par la sonde de fond du réseau présentent de fortes différences avec les observations ADCP à proximité des stations de mesures (fortes concentrations en MES au moment des courants de marée sur Fatouville – Figure 19 – **a**).

A l'image de Tancarville, les concentrations moyennes estimées par l'ADCP montrent peu de variabilité transversale (RD/C/RG – Figure 18 et 19 – **b**). D'une rive à l'autre, les concentrations moyennes de MES du réseau SYNAPSES suivent les grandes tendances observées sur le cycle de marée, à l'exception des périodes de flot et de jusant.

Moyenne horizontale en surface et au fond

Les concentrations en MES du réseau en surface (croix rouges) et au fond (croix noires) correspondent relativement aux observations réalisées par l'ADCP, à l'exception d'une campagne en période de crue et de ME (Figure 19 – **c**).

Moyenne globale sur la section

Comme l'ensemble des autres stations, les concentrations en MES observées sur la station de Fatouville, en surface ou au fond (représentées par des croix oranges et vertes respectivement) sous-estiment les concentrations moyennes en MES (points noirs) observées par l'ADCP sur la section transversale et sur le cycle de marée (de $\approx 0.5-1 \text{ g.L}^{-1}$ – Figure 18 et 19 – **c**).



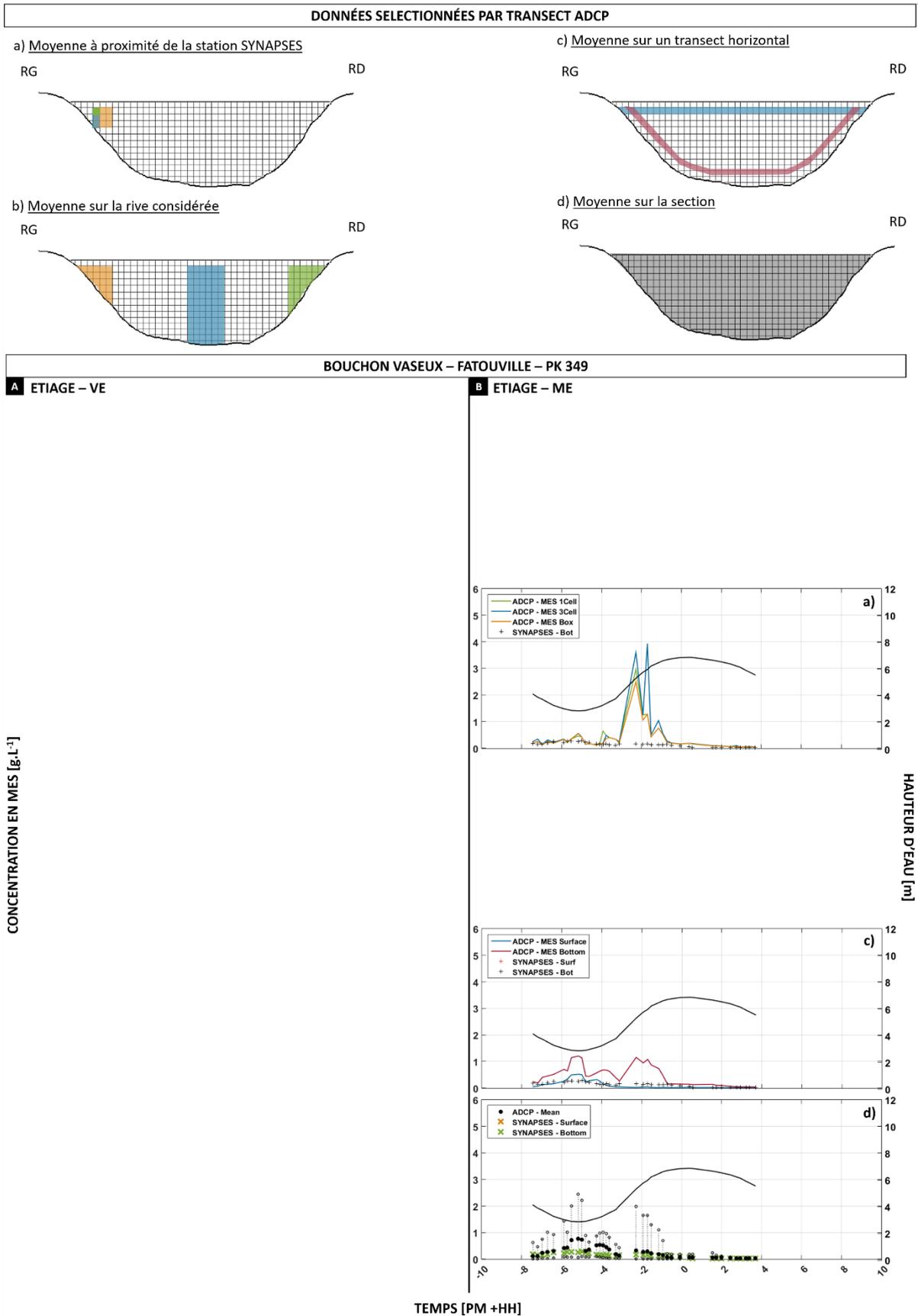


Figure 18 : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes – (a) sur la section (avec en point noir, les concentrations moyennes et en ligne pointillée, les percentiles 2,5 et 97,5 % obtenus par transects ADCP) – (b) sur les profils horizontaux (surface ou fond) – (c) sur la rive considérée (RD : rive droite, C : centre et RG : rive gauche) et (d) à partir de boîtes proches de la mesure ponctuelle (1 cellule, 3 cellules et une boîte 3x3). Exemple pris sur les sites de Fatouville en période : (A) d'étiage/VE et (B) d'étiage/ME.



BOUCHON VASEUX – FATOUVILLE – PK 349

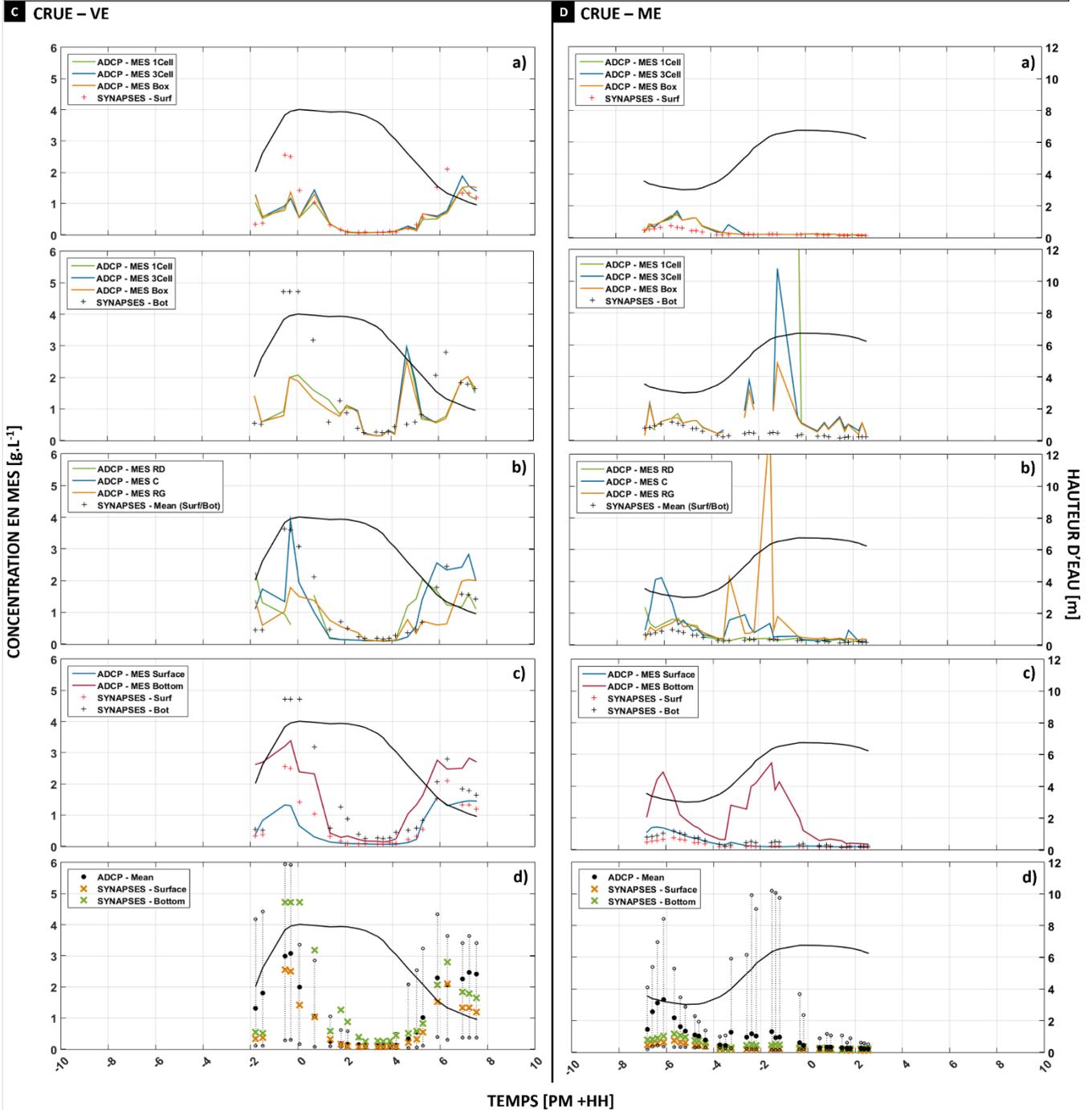


Figure 19 : Représentativité des mesures de concentrations ponctuelles du réseau SYNAPSES vis-à-vis des concentrations moyennes – (a) sur la section (avec en point noir, les concentrations moyennes et en ligne pointillée, les percentiles 2,5 et 97,5 % obtenus par transects ADCP) – (b) sur les profils horizontaux (surface ou fond) – (c) sur la rive considérée (RD : rive droite, C : centre et RG : rive gauche) et (d) à partir de boîtes proches de la mesure ponctuelle (1 cellule, 3 cellules et une boîte 3x3). Exemple pris sur les sites de Fatouville en période : (C) de crue/VE et (D) de crue/ME.

Synthèse – Représentativité de la station de FATOUVILLE

L'analyse des transects ADCP sur la section de Fatouville mettent en évidence une variabilité verticale (surface/fond). Les concentrations moyennes observées à la surface (courbe bleue – entre 0,02 et 1,3 g.L⁻¹ – Figure 18 et 19) augmentent progressivement vers le fond de la colonne d'eau (courbe rose – entre 0,02 et 3,3 g.L⁻¹ – Figure 18 et 19), en lien avec la présence du bouchon vaseux dans cette zone. A l'image de Tancarville, ces forts gradients de concentrations justifient également l'implantation d'une sonde de surface et de fond sur Fatouville. A l'inverse, les concentrations moyennes de MES identiques de la rive gauche vers la rive droite traduisent une absence de variabilité transversale sur le cycle tidal.

Les différentes corrélations réalisées sur le site de Fatouville sont illustrées sur la figure 20 dans le but de juger la représentativité de la station SYNAPSES sur la section ciblée. La pente (α) des droites de corrélation proche de 1 sur la station de Fatouville traduit une bonne représentativité spatiale des mesures de concentrations moyennes obtenues à partir de SYNAPSES et celles de l'ADCP. Les coefficients de corrélation (r) variables verticalement (surface/fond) et dans une moindre mesure, horizontalement (de la rive droite à la rive gauche) peuvent également être mis en relation avec les forts gradients de concentrations dominants dans la zone du bouchon vaseux (Figure 20).

Les concentrations en MES du réseau sur le site de Fatouville (moyenne surface/fond) montrent une bonne adéquation avec les concentrations moyennes de MES observées sur la section globale (Figure 20 – **d**), sur le transect horizontal de surface (pente α à 0,73-0,97 et coefficient r autour de 0,83-0,85 – Figure 20 – **c**), mais semblent être surestimées de moitié à proximité de la sonde SYNAPSES de surface, avec des coefficients de corrélation correctes entre 0,70 et 0,74 (Figure 20 – **a**).

En conclusion, la représentativité spatiale des concentrations en MES de la station de Fatouville semble correcte (pente proche de 1). Les concentrations moyennes des MES calculées à partir des données de surface et celles de fond du réseau SYNAPSES permettent ainsi d'estimer les concentrations moyennes de MES sur l'ensemble de la section à Fatouville.



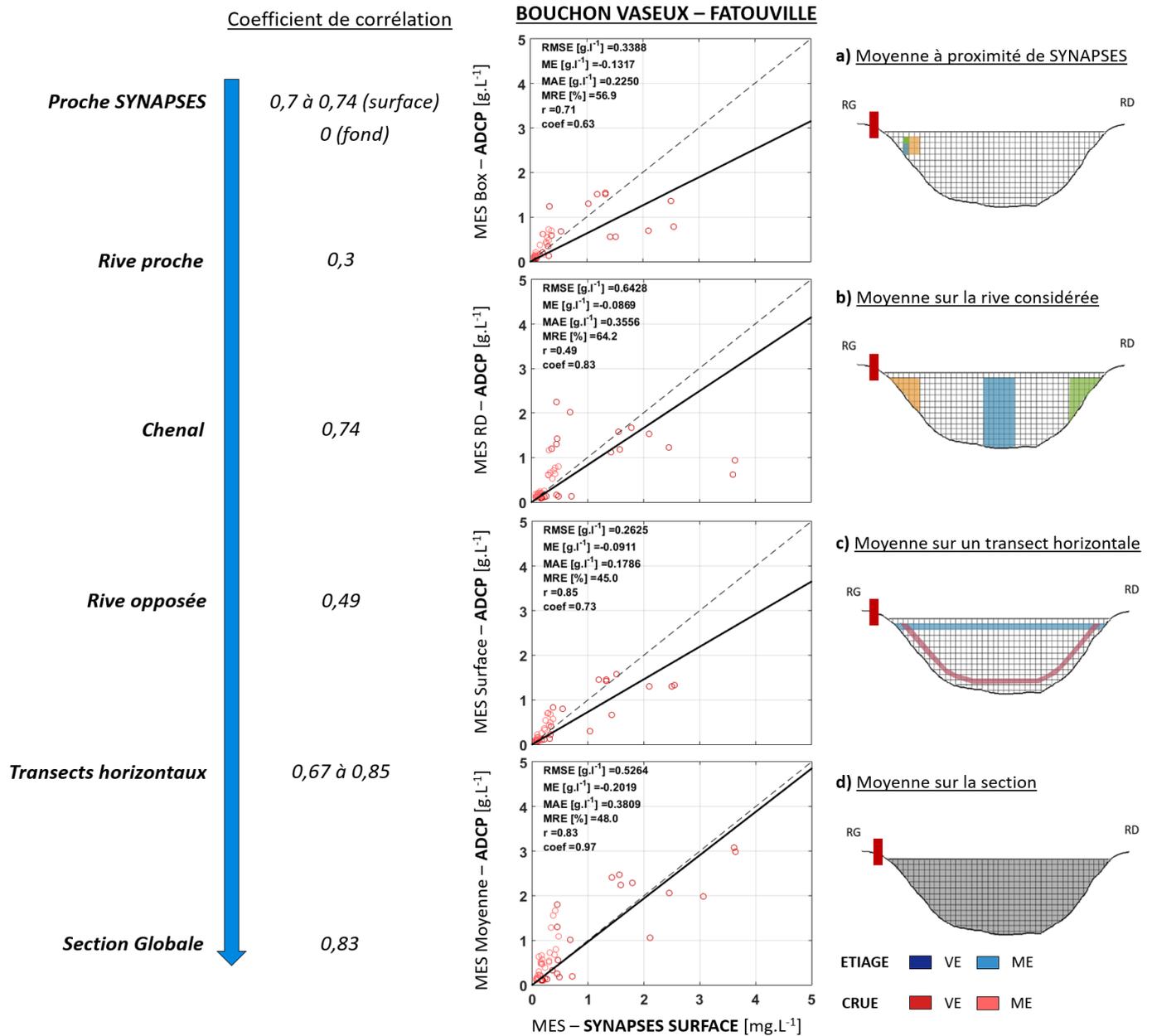


Figure 20 : Corrélations établies sur le site de Fatouville entre les mesures de concentrations ponctuelles de MES du réseau SYNAPSES et les concentrations moyennes de MES issues de l'ADCP – (a) à partir de boîtes proches de la mesure ponctuelle (boîte 3x3) – (b) sur la rive considérée (RG : rive gauche) – (c) sur les profils horizontaux (surface) et (d) sur la section globale.

CONCLUSION

Dans ce rapport, deux méthodes d'inversion ont été utilisées pour inverser les profils d'intensités rétrodiffusées des ADCP en concentrations de MES. La première méthode consiste à établir une courbe de calibration entre l'indice de rétrodiffusion IV [dB] et les concentrations en MES [mg.L^{-1}], par la prise en compte de l'atténuation liée à l'eau α_w , fortement sensible aux conditions environnementale du milieu environnant. La méthode empirique ainsi développée dans notre étude, a été optimisée dans le but de minimiser au maximum les erreurs estimées sur la concentration ADCP par rapport à celle de l'OBS3+ (erreur relative entre 16 et 20%). L'application de cette méthode limitée à des concentrations relativement faibles en MES (inférieures à 100 mg.L^{-1}) a été employée sur les stations fluviales de Rouen et Val-des-Leux.

La deuxième méthode d'inversion du signal présentée dans ce chapitre induit une atténuation des sédiments lorsque les concentrations en MES deviennent relativement élevées (supérieures à $100\text{-}200 \text{ mg.L}^{-1}$). Une méthode hybride combinant à la fois l'empirique et le théorique a été retenue dans notre étude pour estimer les concentrations en MES et leurs erreurs associées, sur les stations de la TMZ, à savoir Tancarville et Fatouville. Cette méthode semble adéquate pour mesurer les concentrations de MES avec des *erreurs relatives comprises entre 25 et 40%*.

La comparaison des concentrations mesurées par l'ADCP sur la section à celles du réseau SYNAPSES a pour but de répondre précisément à la question de la représentativité de ces stations de mesures proches de la berge par rapport à une distribution globale sur la section, à l'échelle du cycle de marée. Sur les stations fluviales (Rouen et Val-des-Leux), les concentrations en MES du réseau (surface) sont relativement corrélées avec les concentrations estimées par l'ADCP, avec néanmoins des sous-estimations de l'ordre de 2 à 2,5 fois sur l'échelle globale (section) et de 1,5 fois sur l'échelle locale (à proximité de la station SYNAPSES), à prendre en compte lors de l'estimation des flux de MES.

Sur les stations de la TMZ (Tancarville et Fatouville), même si les pentes de la droite de corrélation (a proche de 1) montrent une très bonne représentativité entre les mesures de concentrations obtenues à partir de SYNAPSES et de l'ADCP, les coefficients de corrélation (r) sont extrêmement variables verticalement (surface/fond). Cette tendance traduit ainsi la présence de forts gradients de concentrations dominants dans la zone du bouchon vaseux. Néanmoins, l'utilisation d'une moyenne des concentrations en MES, entre les données de surface et celles de fond du réseau SYNAPSES, permet d'estimer correctement la dynamique moyenne des MES sur la section complète.



BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- 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.
- Druine, F., Lafite, R., Deloffre, J., Verney, R., et Lemoine, J.P., 2016.** SUSPENSE : Rapport technique sur la variabilité des coefficients de calibration NTU/mg.L^{-1} du réseau SYNAPSES. *Rapport Seine-Aval 5*, 27pp.
- Gartner, 2004.** Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, 211, 169–187.
- 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.
- Hanes, D.M., 2012.** On the possibility of single-frequency acoustic measurement of sand and clay concentrations in uniform suspensions. *Continental Shelf Research*, 46, 64–66.
- Holdaway, G.P., Thorne, P.D., Flatt, D., Jones, S.E. et Prandle, D., 1999.** Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 19, 421–441.
- Horowitz, A.J., 2008.** Determining annual suspended sediment and sediment-associated trace element and nutrient fluxes. *The Science of the Total Environment*, 400, 315–343.
- 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., Pierrefeu, G., Saisset, G., Brochot, J.F. et Marchand, P., 2008.** Mesures hydrologiques par profileur à effet Doppler (aDcp). *Editions Quae*, 157pp.
- Le Coz, J., Larrarte, F., Saisset, 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.

Lewis, J. and Eads, R., 2008. Implementation Guide for Turbidity Threshold Sampling: Principles, Procedures, and Analysis. *General Technical Report PSW-GTR-212*, Albany, CA: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 86pp.

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.

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.

Raymond, S., 2011. Incertitudes des flux transportés par les rivières (Matière en suspension, nutriments, sels dissous) Vers un système expert d'optimisation des méthodes de calcul. *PhD Thesis*, Université François Rabelais, Tours, 293pp.

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.



POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT

Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval
Pôle Régional des Savoirs
115 boulevard de l'Europe
76100 ROUEN
Tél : 02 35 08 37 64
gipsa@seine-aval.fr

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il devra être cité sous la forme suivante :

Flavie DRUINE, Julien DELOFFRE, Romaric VERNEY, Jean-Philippe LEMOINE et Robert LAFITE, 2018. **SUSPENSE** : Représentativité des sites de mesures SYNAPSES selon différentes conditions hydrodynamiques. Rapport Seine-Aval 5, 49p.

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

Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

