



PHRESQUES

Innovation : couplage des méthodes optiques et acoustiques pour la mesure des MES

Romaric Verney, Duc Tran, Matthias Jacquet

Le projet PHRESQUES s'inscrit dans le CPIER Vallée de Seine et est soutenu financièrement par l'AESN et les régions Ile de France et Normandie.



Le projet PHRESQUES est labellisé Zone Atelier Seine.



RÉSUMÉ EXECUTIF

Comprendre et alerter sur les modifications de l'environnement côtier et estuarien nécessite de réaliser des observations fiables et de qualité. Le suivi de la dynamique sédimentaire se fait classiquement au moyen de turbidimètres optiques, calibrés via des prélèvements en concentration en matières en suspension. Cette méthode, fiable pour les sédiments fins, ne permet pas de caractériser les sédiments sableux en suspension. Or, cette fraction sédimentaire est largement présente en estuaire et mer côtière, et comprendre sa dynamique est essentielle pour analyser la dynamique globale du système, et notamment son évolution morpho-sédimentaire.

Cette action du projet PHRESQUES phase 2 a pour objectif d'étudier l'apport du couplage de méthodes optiques et acoustiques pour qualifier et quantifier les fractions sableuses et de sédiment fin en suspension. Des expérimentations en milieu contrôlé ont permis de valider le concept d'un indice de composition du sédiment (SCI) et de construire une méthode aboutissant à une évaluation des concentrations de sable et sédiments fins en suspension.

Ces approches (en particulier l'indice SCI) ont ensuite été testées sur différents systèmes côtiers, dont l'estuaire de Seine.

SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPES

- **Equipe 1 : Ifremer, DYNECO/DHYSED, Brest**

Coordination scientifique : Romaric Verney

Autres chercheurs (ou équivalents) : Duc Tran ; Matthias Jacquet

REMERCIEMENTS

Nous remercions le CPIER PHRESQUES pour le financement de ce projet de recherche et d'observation, le GIP Seine Aval pour sa coordination.

INTRODUCTION

Les stations de mesures à haute fréquence structurant le méta-réseau PHRESQUES mobilisent de façon générique des capteurs optiques pour la quantification de la qualité de l'eau, et notamment la concentration en matières en suspension. Ces capteurs mesurent indirectement la charge en suspension, et requièrent un effort significatif de calibration afin de produire une donnée de bonne précision. Toutefois, cette méthodologie se heurte à deux verrous majeurs :

- i) Les calibrations sont peu régulières, et souvent représentatives de conditions hydrométéorologiques particulières : les événements de tempête sont par exemple non renseignés ;
- ii) Les capteurs optiques sont principalement sensibles aux sédiments fins, ils ne permettent donc pas d'obtenir une charge particulaire totale (sable et vase notamment), ce qui limite leur utilisation. Par ricochet, il existe également très peu de données sur la dynamique des sables en suspension en estuaire en réponse aux forçages.

L'objectif de cette action est d'évaluer la capacité d'identifier, de caractériser et de quantifier les concentrations des différents types de MES (vases, sables,...) observés entre Poses et la Baie de Seine, en analysant la modulation de réponse des capteurs optiques multi longueurs d'ondes et des capteurs acoustiques multi fréquences.

Cette action se structure autour de deux tâches :

- T2.1 : évaluation en milieu contrôlé (cuve expérimentale DEXMES) des réponses des instruments pour différentes compositions de MES en sable/vase.
- T2.2 : campagnes de mesure in situ permettant de confronter les résultats des travaux expérimentaux à la vérité terrain, tant sur la différenciation de la nature des sédiments que sur leur concentration massique respectives.

EXPERIMENTATIONS EN MILIEU CONTROLE

Ces travaux ont été réalisés à travers le projet de recherche postdoctorale de Duc Tran, et une collaboration avec TU Delft.

I. Démarche conceptuelle

L'hypothèse de départ repose sur la sensibilité spécifique respective des capteurs optiques aux sédiments fins (vaseux) et des capteurs acoustiques aux sables (fins et moyens, en fonction des fréquences acoustiques). Ainsi, théoriquement, la confrontation de la dynamique des signaux de chaque capteur doit nous permettre de préciser la composition, a minima qualitative, des sédiments en suspension.

La première approche consiste à réaliser une observation conjointe des observations optiques et acoustiques afin de construire un indicateur de la composition des sédiments en sable/vase. Cet indicateur (SCI pour Sediment Composition Index) a été construit et testé dans un premier temps sur le couple OBS3+ (ou Wetlabs FLNTU, similaire) et ADV 6MHz Vector (SNR, en dB), sur la base de leur réponse théorique (en NTU et dB respectivement) à la concentration et aux types de MES. Si nous repartons de l'équation du Sonar (Fettweis et al., 2019 ; Pearson et al., 2021 ; Verney et al., 2024) nous obtenons :

$$SNR = C - 20\log_{10}(\psi \cdot R^2) - \int_0^R (\alpha_w(r) + \alpha_s(r)) dr + 10\log_{10}\left(\frac{C_{MES} \cdot \bar{\sigma}}{\rho_s \cdot \bar{V}_s}\right)$$

Où SNR est le rapport signal sur bruit acoustique (dB) et C_{MES} la concentration en matières en suspension. Pour les capteurs acoustiques ponctuels, vues les concentrations en MES étudiées (<1g/l) et les faibles distances (R) entre la source acoustique et les récepteurs, l'atténuation par l'eau et les sédiments (α_w et α_s) est considérée négligeable. L'équation ci-dessous peut ainsi réécrire :

$$10\log_{10}(C_{MES}) = SNR - 10\log_{10}\left(\frac{\bar{\sigma}}{\rho_s \cdot \bar{V}_s}\right) + C' = SNR + b' + C'$$

C' dépend des caractéristiques de l'instrument, et b' dépend des caractéristiques des particules en suspension (tailles et volume (V_s , densité ρ_s , σ la section de rétrodiffusion)).

Une analyse analogue peut être faite pour les turbidimètres optiques (Sutherland et al ; Druine et al. ; Pearson et al., 2021) :

$$C_{MES} = \alpha_{OBS} \frac{\rho_s \cdot d}{Q_s} OBS$$

Soit

$$10\log_{10}(C_{MES}) = 10\log_{10}\left(\alpha_{OBS} \frac{\rho_s \cdot d}{Q_s}\right) + 10\log_{10}(OBS) = d' + 10\log_{10}(OBS)$$

La variable d' intègre ici les caractéristiques des particules en suspension, taille (d), densité (ρ_s) et efficacité de rétrodiffusion (Q_s). Les deux équations, optiques et acoustiques, peuvent ainsi être combinées tel que :

$$SCI = 10 \log_{10}(OBS) - SNR$$

Où l'indice de composition des sédiments (SCI) intègre l'ensemble des informations relatives à la nature des particules en suspension.

Les capteurs optiques sont globalement interchangeables dans l'équation du SCI, modulo un coefficient de calibration entre unités (NTU, volts, m^{-1}). Pour les capteurs acoustiques, l'équation doit être adaptée : pour l'Aquascap, la concentration en MES est proportionnelle au carré du signal acoustique ; pour le LISST-ABS, le traitement du signal interne au capteur aboutit à la fourniture en sortie d'une mesure linéairement comparable à la concentration en MES.

Ainsi, théoriquement, le SCI est plus fort lorsque les MES sont dominées par les sédiments fins, tandis que SCI sera plus faible lorsque les sables dominent.

II. Méthodologie

Plusieurs séries de tests mélangeant sables et vases ont été réalisées à partir de la cuve expérimentale DEXMES (Figure 1), permettant de déployer dans le même volume test un grand nombre de capteurs optiques et acoustiques. Deux types de sédiments fins sont utilisés - vase de La Roque tamisée à $63\mu m$ ($d_{50}=15.4\mu m$) et bentonite ($d_{50}=16.6\mu m$) - et deux sables (modes à $100\mu m$ et $220\mu m$). Les spectres en classe de taille des sédiments obtenus par granulométrie laser sont présentés Figure 2.

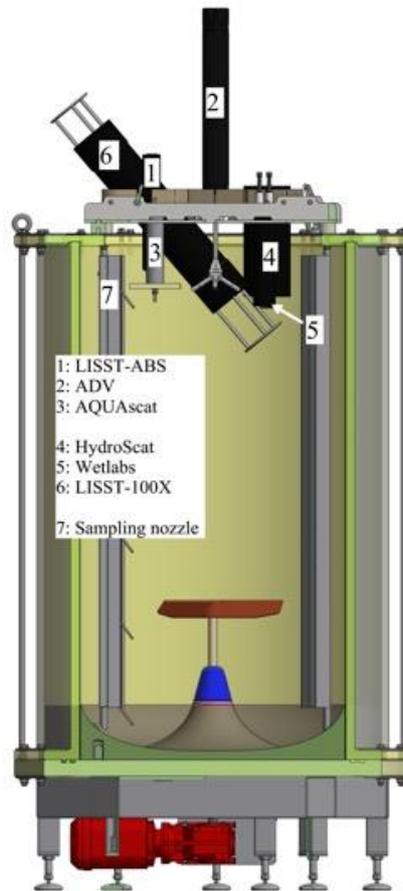


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental DEXMES et du déploiement des différents capteurs optiques et acoustiques

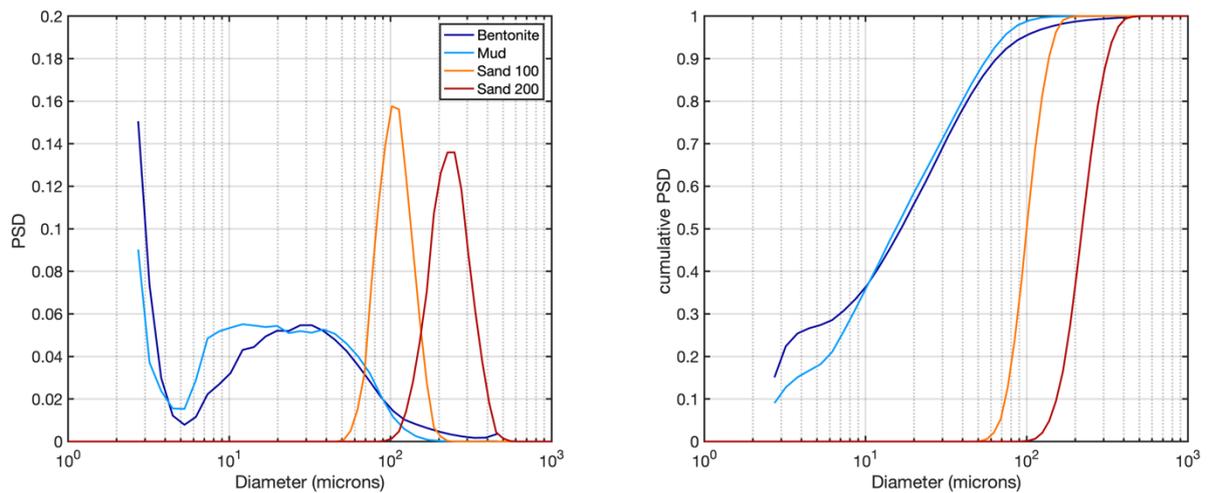


Figure 2 : Spectres en classe de taille des sédiments utilisés pour les tests expérimentaux dans la cuve DEXMES. Sédiments fins : vase naturelle et bentonite ; Sédiments sableux : S1 (mode $\sim 100\mu\text{m}$) et S2 (mode $\sim 200\mu\text{m}$)

Les deux premières séries ont démarré avec un sédiment purement vaseux (vase de la Roque) et le mélange a été progressivement modifié via l'augmentation par palier de la teneur en sable (une expérience par type de sable), testant ainsi un gradient de fraction de sable : 0%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 95% (Pearson et al., 2021).

Les deux dernières séries consistaient à tester 6 niveaux de concentrations (répartis entre 15mg/l et 200mg/l) pour différents mélanges sables/vase (e.g. 0, 25%, 50%, 75% et 100% de sable mélangé à la bentonite), une série par type de sable, soit 60 tests au total. Une troisième série a été utilisée pour valider les relations, et a également permis de réaliser des mélanges tri-modaux et de tester la sensibilité des résultats à des mélanges complexes, comme potentiellement attendus in situ.

Pour chacun des tests et paliers, des prélèvements sont réalisés et traités de façon à déterminer les concentrations des différentes classes de sédiment.

Différents types de capteurs optiques et acoustiques sont testés, de façon à analyser leur sensibilité intrinsèque aux mélanges sables/vases et pour évaluer les meilleurs couples optiques/acoustiques. Leurs caractéristiques sont rappelées dans le Tableau 1. L'Aquascats est un capteur acoustique multifréquence, mesurant l'intensité acoustique rétrodiffusée à 0.5, 1, 2 et 4MHz. L'ADV est un vélocimètre acoustique à 6MHz, et le LISST-ABS est un capteur acoustique monofréquence à 8MHz. De façon analogue, l'HYDROSCAT est un capteur optique à rétrodiffusion à 4 longueurs d'ondes : 420, 532, 620 et 852nm. Il est complété par le turbidimètre Wetlabs FLNTU à 700nm, actuellement utilisé sur SCENES.

Cet ensemble de capteurs permet de balayer une très large gamme de fréquences acoustiques et de longueurs d'ondes, et ainsi d'explorer en profondeur les interactions possibles entre les deux technologies.

Pour la première série de test, seuls l'ADV (f=6MHz) et un turbidimètre OBS3+ ($\lambda \sim 860\text{nm}$) sont utilisés.

Tableau 1 : Caractéristiques des capteurs optiques et acoustiques mobilisés pour la seconde série d'expérimentations

Sensor	Working frequency [MHz]	Sampling frequency	Data output	Notation in text	
	wavelength [nm]	[Hz]	unit		
Acoustic	LISST-ABS	8	1	mg/L	A ₈
	ADV Vector	6	32	SNR - dB	A ₆
	AQUAscat 1000R (Transducer 4 MHz)	4	32	count	A ₄
	AQUAscat 1000R (Transducer 2 MHz)	2	32	count	A ₂
	AQUAscat 1000R (Transducer 1 MHz)	1	32	count	A ₁
	AQUAscat 1000R (Transducer 0.5 MHz)	0.5	32	count	A _{0.5}
Optical	HydroScat-4 (Channel 4)	852	1	m ⁻¹	O ₈₅₂
	Wetlabs_FLNTU	700	1	count -> NTU	O ₇₀₀
	HydroScat-4 (Channel 3)	620	1	m ⁻¹	O ₆₂₀
	HydroScat-4 (Channel 2)	532	1	m ⁻¹	O ₅₃₂
	HydroScat-4 (Channel 1)	420	1	m ⁻¹	O ₄₂₀

III. Sediment composition Index

1. Validation du concept

Le concept d'indice de composition du sédiment (SCI) est dans un premier temps évalué via des expérimentations dans le dispositif DEXMES, combinant les réponses de l'ADV (acoustique) et de l'OBS3+ (optique). Ce travail a fait l'objet d'une publication par Pearson et al. (2021).

L'indice SCI est calculé selon la formulation décrite ci-avant. Une normalisation est réalisée afin de pouvoir intercomparer différents couples d'expérience : le SCI est considéré égal à 0 pour des sédiments fins seuls.

La Figure 3 illustre la construction de l'indice SCI. Les figures 3a et 3c montrent, pour un mélange vase et sable à 100 μm , que la réponse en concentration en MES pour un mélange donné suit une droite linéaire dans l'espace (dB ; $\log_{10}(\text{NTU})$), comme attendu théoriquement. Le changement de mélange se traduit par différentes lignes parallèles entre elles, la distance en dB correspondant à l'indice SCI. Les mêmes observations sont réalisées avec le sable à 200 μm (figures 3b et 3d), avec toutefois deux nuances : i) pour une fraction de sable identique, le SCI calculé pour un sable à 100 μm est légèrement plus faible que pour un sable à 200 μm ; ii) pour de faibles concentrations en sable pur, le capteur optique est limité par sa sensibilité : les premiers paliers de concentrations ne sont pas utilisables.

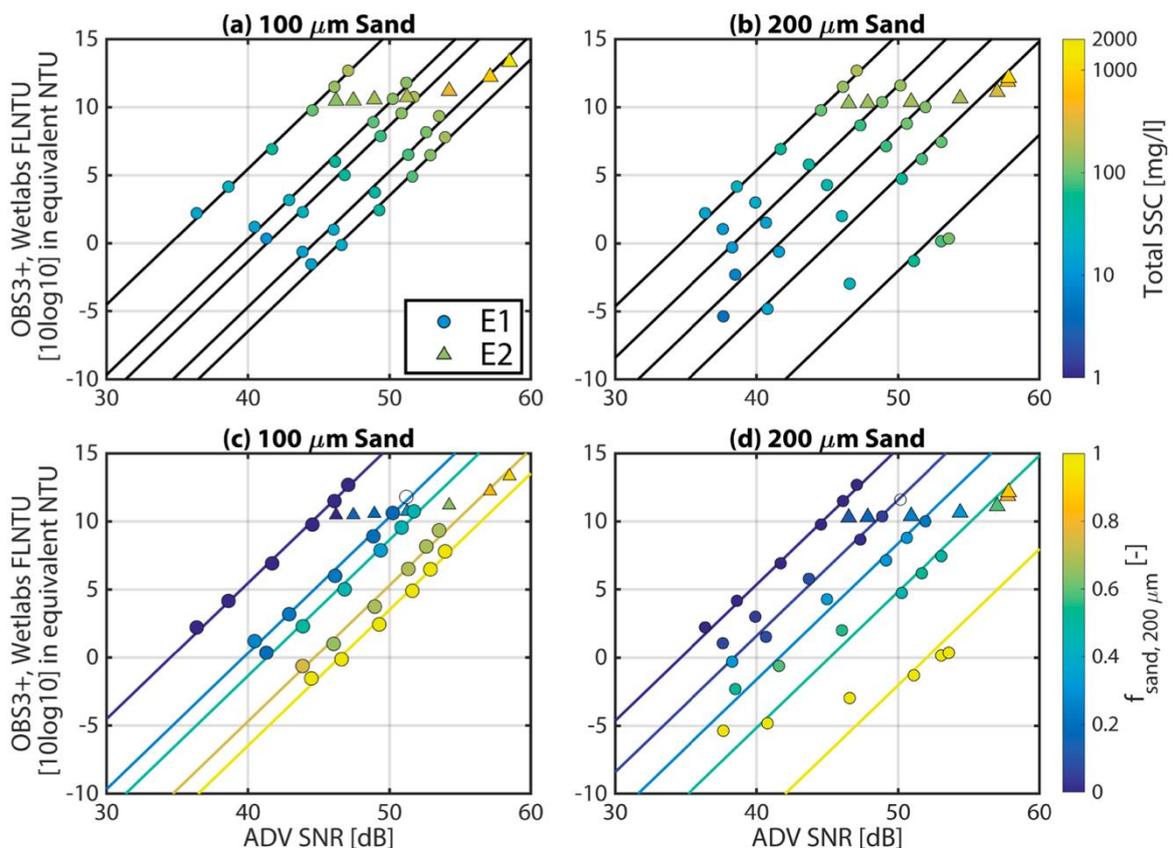


Figure 3 : Synthèse des expériences DEXMES sur la réponse combinée des capteurs optiques et acoustiques pour différentes conditions de mélanges sables/vase (S1 100 μm gauche ; S2 200 μm droite) et différents niveaux de concentration en MES. Pearson et al., 2022. Haut : l'échelle de couleur indique la concentration totale en MES ; bas : la fraction de sable en suspension.

2. Extension du concept qualitatif à une estimation de la fraction de sable en suspension

Le concept validé, nous pouvons l'utiliser pour en déduire la nature du mélange en suspension. Dans ce cas, les valeurs de SCI sont comparées aux fractions de sables issues des expérimentations en laboratoire (Figure 4). La Figure 4a illustre ce résultat, pour les deux types de sables utilisés. Les observations avec le sable à 100µm (S1) sont moins bruitées qu'avec le sable à 200µm (S2), mais on peut globalement voir que les deux types de sables suivent la même fonction, avec une enveloppe de +/-25%. Une unique relation est donc recherchée, plus compatible avec l'incertitude des caractéristiques des sédiments sableux en suspension en milieu côtier :

$$f_{sand} = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh \left[\frac{-(SCI - SCI_{50\%})}{\Delta SCI} \right] \right) \cdot 100\%$$

Où $SCI_{50\%} = -8.58$ et $\Delta SCI = 3.85$.

Les incertitudes sont plus précisément évaluées (Figure 4b et c), et montre que la fonction empirique produits des résultats avec une incertitude inférieure à 10% pour l'ensemble des échantillons pour S1 et 70% des échantillons pour S2.

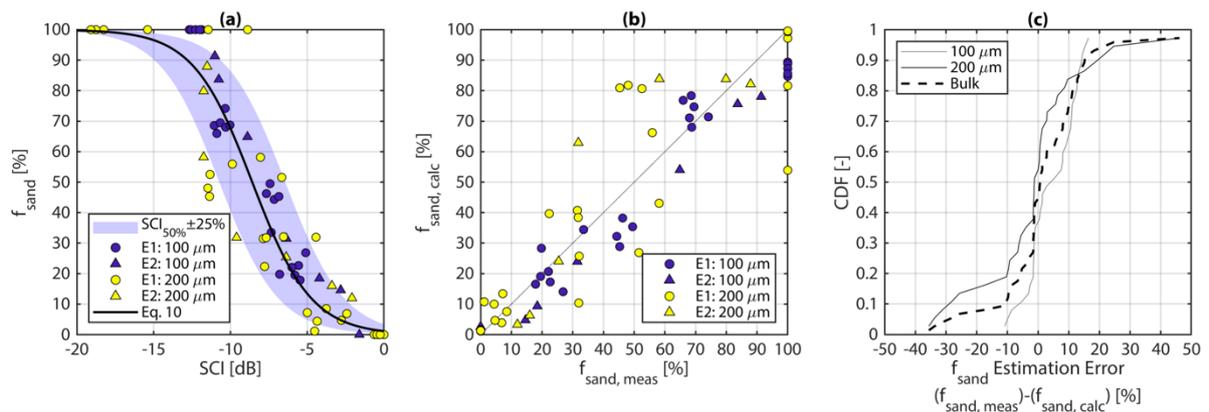


Figure 4 : Relation entre indice SCI (Sediment Composition Index) et la fraction de sable, et évaluation de la formulation empirique élaborée et des incertitudes associées. Pearson et al., 2021.

IV. Étude étendue du couplage optique-acoustique en laboratoire : évaluation des concentrations sable/vase en suspension

Ce travail, piloté par Duc Tran pendant son postdoc sur le projet, fait l'objet d'une publication en révision dans le journal Earth and Space Science de l'AGU.

1. Rappel méthodologique

Le second objectif de cette tâche consistait à estimer, non plus qualitativement mais quantitativement, les masses sableuses et vaseuses en suspension. Selon une approche similaire au calcul de l'indice SCI, la comparaison des intensités des signaux optiques et acoustiques permet de calculer une fraction de sable en suspension (voir ci-dessus). Une bibliothèque de relations entre concentration massique et réponse des capteurs (optiques et acoustiques) par fraction de sable est ensuite générée et permet d'estimer la concentration totale sable et vase à la fois via le capteur optique et acoustique.

Cette approche est évaluée à partir d'un grand nombre de combinaisons de capteurs optiques et acoustiques, comme rappelé ci-avant.

Un exemple de cette approche est illustré en Figure 5 pour le couple Wetlabs FLNTU (optique) et LISST ABS (acoustique), et pour un sable fin ($100\mu\text{m}$). Un ensemble de configurations de mélanges sables/sédiments fins et de concentration totale croissante est introduite de façon homogène dans le dispositif DEXMES, et la réponse des différents capteurs optiques et acoustiques est enregistrée. La Figure 5a montre la relation entre les réponses des deux capteurs, pour ces différents mélanges. On observe que pour un mélange donné, une réponse linéaire existe entre ces deux capteurs. Pour un mélange de plus en plus sableux, l'intensité du signal acoustique est plus intense que l'intensité du signal optique, conduisant à une diminution de la pente Wetlabs/ABS. Ce ratio peut donc être utilisé comme proxy de la fraction sableuse ou vaseuse (Figure 5b).

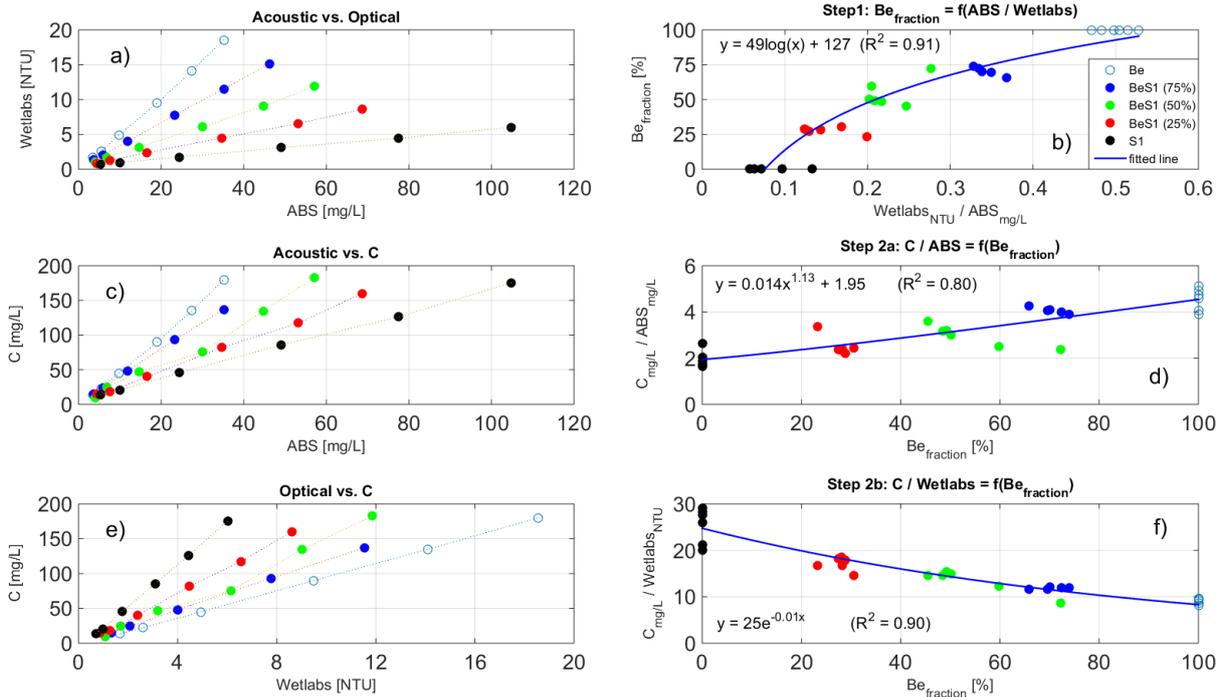


Figure 5 : Illustration de la méthode de couplage optique / acoustique pour l'estimation des concentrations massique totale en suspension (sable + vase) pour le couple de capteurs LISST ABS/FLNTU Wetlabs.

Individuellement et pour un mélange sable/sédiments fins donné, chaque capteur se caractérise également par une relation linéaire entre signal et concentration (Figure 5c et e), dont la pente varie en fonction de la fraction sableuse ou en sédiments fins. Une relation puissance est donc recherchée entre pente de calibration et fraction en sédiments fins (Figure 5d et f). Au final, une mesure combinée de LISST ABS et de FLNTU Wetlabs permet successivement de connaître la fraction vaseuse et ensuite la concentration massique totale.

2. Évaluation des concentrations en sable/vase

La fiabilité de cette approche est évaluée en comparant la fraction estimée à la fraction imposée lors de l'expérience (et vérifiée par prélèvement), ainsi que les concentrations totales calculées et mesurées par prélèvement (Figure 6Erreur ! Source du renvoi introuvable.). Les incertitudes observées sont faibles, inférieures globalement à +/-20% pour les concentrations totales, et entre 20 et 40% pour la fraction de sable. Ces estimations sont globalement équivalentes qu'elles soient finalement évaluées via le capteur optique ou acoustique (Figure 6h).

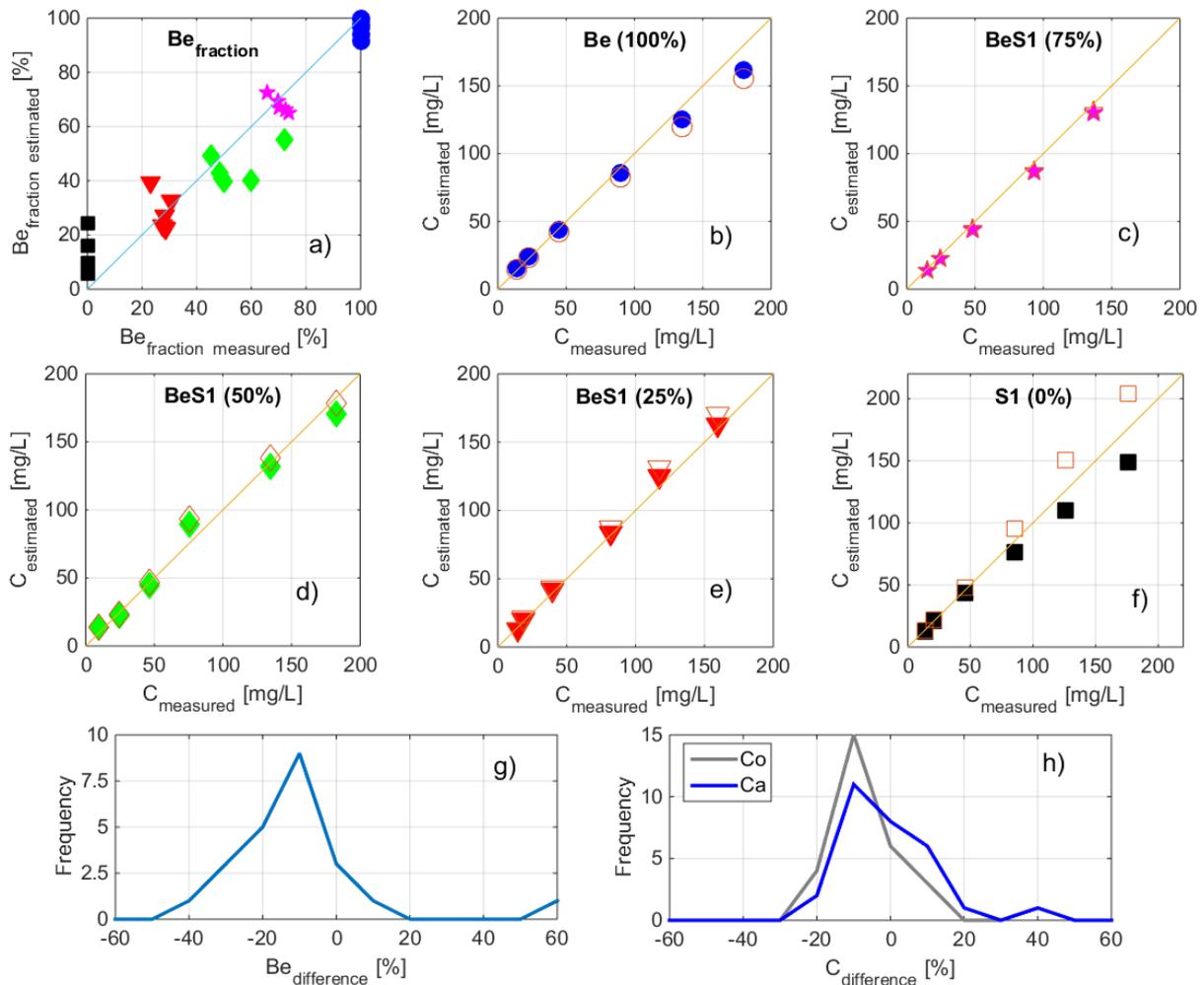


Figure 6 : Comparaison des fractions en sédiments fins et des concentrations massiques totales calculées et observées par prélèvements à partir du couple LISST ABS/FLNTU Wetlabs pour les différentes configurations de mélanges sables (S1-100 μ m)/sédiments fins. Les concentrations totales sont calculées à partir du capteur optique (marqueur plein) et du capteur acoustique (marqueur vide)

Afin d'extrapoler cette approche, différents couples de capteurs optiques (λ =[420-852]nm) et acoustiques (f =[0.5-8]MHz) ont été mobilisés et inter-comparés, pour différents mélanges de sédiments fins et de sables (100 μ m et 200 μ m).

Les résultats ont montré que des relations distinctes peuvent être recherchées pour chaque type de sable et chaque couple de capteurs. Les différences entre relations pour chaque type de sable restent faibles, et la taille des sables en suspension est un paramètre complexe à évaluer in situ. Nous avons donc choisi de fusionner les résultats expérimentaux pour les deux types de sable (comme précédemment avec le SCI), et de rechercher une relation unique pour chaque couple de capteur, ainsi utilisable sans distinction de classe de sable.

Pour le couple LISST ABS/FLNTU Wetlabs (1^{ère} ligne, 2^{ème} colonne Figure 7), l'utilisation d'une relation indépendante des classes de sable conduit à une incertitude plus importante sur la concentration en MES totale calculée, de l'ordre de +/- 50% contre +/- 20% pour une relation spécifique (Figure 6).

La comparaison systématique des différents couples de capteurs (Figure 7 et Figure 8) montre que le choix de la longueur d'onde du capteur optique semble peu impacter le calcul des fractions et

concentrations, les incertitudes étant similaires pour un capteur acoustique donné. Au contraire, le choix du capteur acoustique est déterminant. Le meilleur résultat est obtenu avec l'ADV, de fréquence acoustique à 6MHz. Pour ce capteur, les incertitudes sont toutes inférieures à +/-50%, et les percentiles 25/75 indiquent des incertitudes de l'ordre de +/-20%, malgré l'utilisation d'une relation unique indépendante des types de sables (Figure 7). L'utilisation d'un capteur acoustique de fréquence inférieure (4MHz, 2MHz ou 1MHz) montre une dégradation significative des performances de la méthode couplée, avec des incertitudes croissantes atteignant 100% pour le 4MHz et plus de 400% pour les fréquences les plus faibles. Cette dégradation de performance s'explique par le lien entre fréquence acoustique et taille de particule acoustiquement sensible : plus la fréquence augmente, plus la rétrodiffusion est optimale pour des particules de grandes tailles, qui donc s'éloignent de la taille des sables en suspension. Pour la même raison, augmenter la fréquence acoustique revient à détecter principalement des particules de plus petites tailles, qui s'éloignent des modes des sables. Ainsi, l'optimum en fréquence acoustique pour les mélanges et sables testés est autour de 6MHz. Des fréquences de 4 MHz ou 8MHz peuvent également être utilisées, avec pour conséquence une augmentation de l'incertitude sur les concentrations en MES totales.

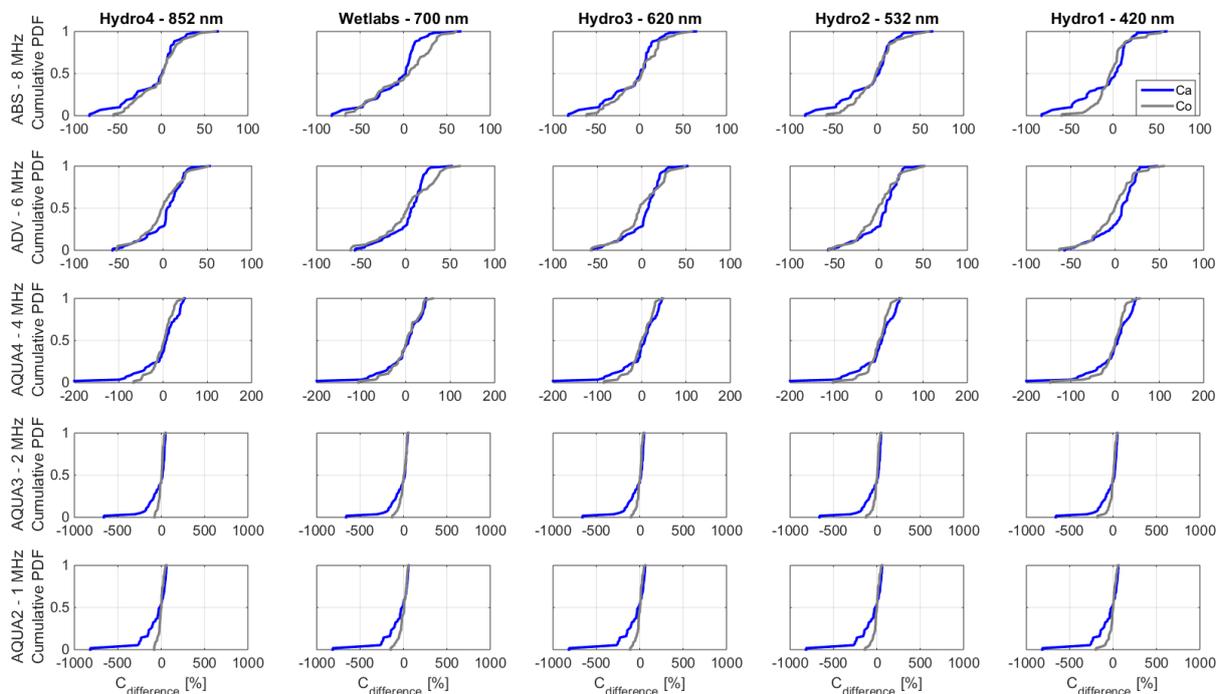


Figure 7 : Distribution cumulée des incertitudes des concentrations en MES totales calculées pour différents couples de capteurs optiques (en colonne) et acoustiques (en ligne). Les courbes bleues représentent les incertitudes calculées à partir du capteur acoustique, les courbes grises celles calculées à partir du capteur optique. Un modèle unique, indépendant des tailles de sable, est utilisé.

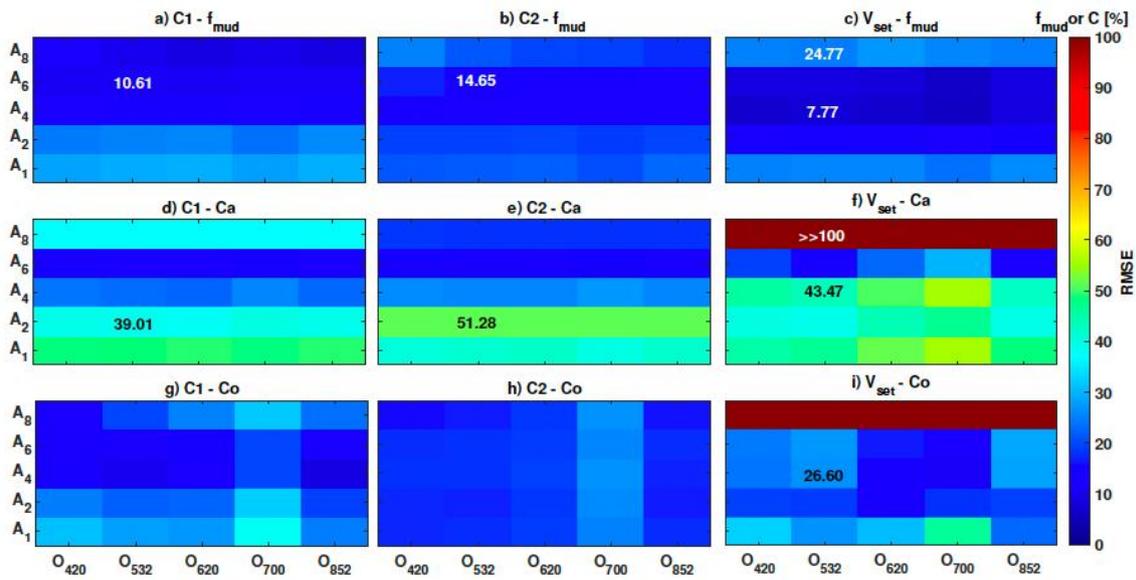


Figure 8 : Bilan des incertitudes moyennes (NRMSE) sur les fractions de sédiment fin en suspension ou de concentration totale pour les tests S1 (a,d,g), S2 (b,e,h) et mélanges multimodaux (c,f,i) en fonction des couples de capteurs optiques (abscisse) et acoustiques (ordonnée).

V. Applications

L'indice SCI et le calcul de la fraction de sable en suspension associée peut maintenant être appliqué sur différents jeux de données in situ, sur deux sites distincts : l'estuaire de Seine et la Wadden Sea, et plus particulièrement l'embouchure tidale d'Ameland.

a. Embouchure tidale d'Ameland – Collaboration avec TU Delft

Dans le cadre de son projet de recherche doctorale Stuart Pearson souhaitait étudier les flux liquides mais surtout solides transitant par l'embouchure tidale d'Ameland, à l'interface entre la mer des Wadden (zone intertidale marquée par un réseau de chenaux) et le sud de la Mer du Nord (Figure 9). La stratégie d'observation reposait notamment sur le déploiement de différents tripodes, structures benthiques permettant d'accueillir différents types de capteurs, dont un ADV et un OBS3+, similaires à ceux déployés lors des expérimentations en laboratoire.

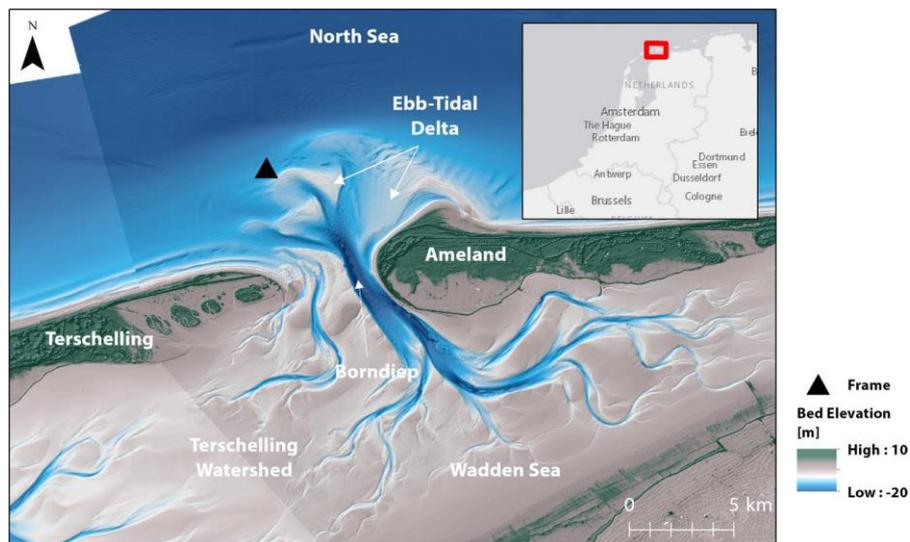


Figure 9 : Embouchure tidale d'Ameland, à l'interface entre la mer des Wadden et le sud de la mer du Nord. Le triangle noir indique la position des capteurs optiques et acoustiques.

Le tripode et les capteurs ont été déployés pendant près de deux mois, et l'indice SCI a ainsi pu être calculé sur l'ensemble du déploiement, et confronté aux conditions tidales et d'agitation (Figure 10).

En période de faible agitation (période autour du 24/09), la dynamique est principalement contrôlée par la marée. On peut alors observer que l'indice SCI est plus faible au flot, et dans une moindre mesure au jusant, et plus fort autour des étales de PM et de BM (voir également Figure 11). Ce résultat est en accord avec la dynamique attendue : au flot, les courants sont intenses et dirigés de la Mer du Nord vers la Mer des Wadden. L'embouchure externe est majoritairement constituée de sédiments sableux, les sédiments importés au moment du flot sont donc dominés par les sables, et l'indice SCI est faible. Au jusant, les courants sont plus faibles et un mélange de sable et vase (provenant de la mer des Wadden) est exporté par les courants, l'indice SCI reste donc faible mais comparativement plus fort

qu'au flot. Aux étales, les courants sont faibles et ne permettent pas de maintenir les sables en suspension. Les MES sont donc majoritairement composées de sédiments fins, ce qui correspond à un SCI plus grand. On observe une dynamique plus basse fréquence, associée au cycle VE/ME, avec un SCI proche de -5dB et une fraction de sable en suspension autour de 0 en ME, en période de faible énergie, alors que le SCI et la fraction de sable en suspension varie à l'échelle de la marée en VE comme expliqué précédemment.

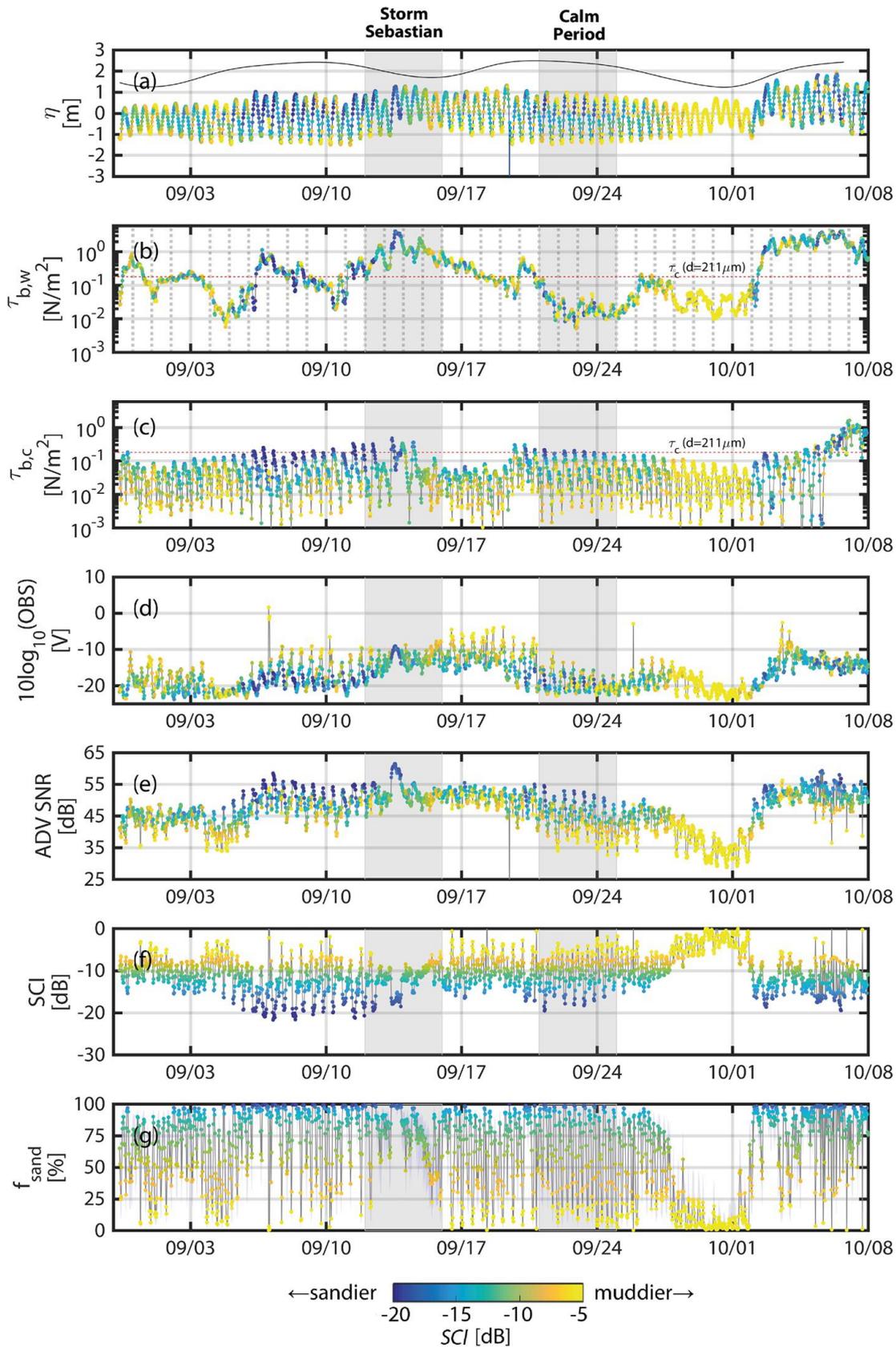


Figure 10 : Série temporelle des principaux paramètres hydrodynamiques, d'intensité optique et acoustique en septembre/octobre 2017. Le SCI et la fraction de sable sont calculés à partir de l'algorithme développé en laboratoire.

La Figure 11 permet d'illustrer plus explicitement l'influence de l'intensité des forçages hydrodynamiques sur la composition des sédiments en suspension. Aux étales de PM et BM (Figure 11b et d), les forçages en courant sont faibles ($\tau_{b,c} < 0.1 \text{N.m}^{-2}$). En l'absence de vagues, l'indice SCI est proche de 0, indiquant des sédiments fins majoritairement en suspension. En présence de vague, l'indice diminue illustrant la remise en suspension locale de sédiments sableux. Aux périodes de flot et de jusant (Figure 11a et c) l'indice SCI diminue avec l'augmentation de la contrainte de courant, et également avec l'augmentation de la contrainte de vague : les sédiments en suspension sont principalement fins en ME et sableux en forte VE et/ou en présence de vagues. On peut également remarquer que l'indice SCI est légèrement plus faible au flot qu'au jusant pour un forçage équivalent, ce qui s'expliquerait par la présence de sédiments principalement vaseux sur les zones intertidales de la Mer des Wadden, et donc un mélange sable/vase exporté au jusant et des sédiments plutôt sableux côté Mer du Nord, entrants au flot.

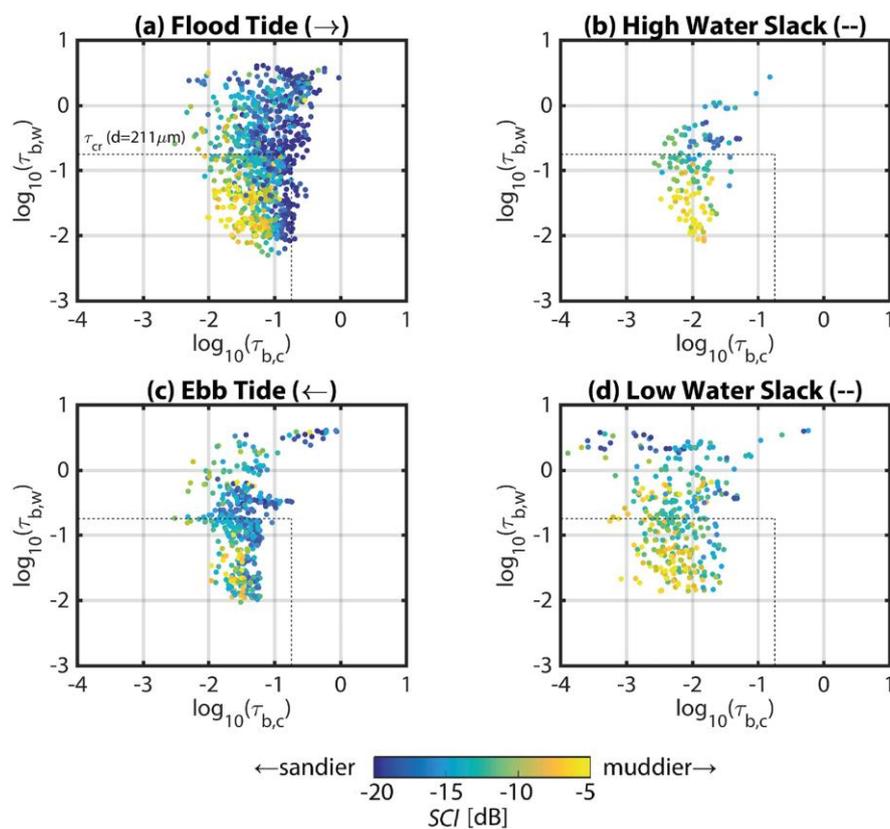


Figure 11 : Relation entre forçages hydrodynamiques (contrainte de vague et de courant) et indice SCI de composition du sédiment en suspension, pour les quatre phases de la marée (Flot/PM/jusant/BM)

b. Embouchure de l'Estuaire de Seine - mesures MORPHOSEINE

Le projet SA6 MORPHOSEINE avait pour objectif d'étudier la réponse morphodynamique de l'embouchure de l'estuaire de Seine aux forçages naturels et anthropiques. En parallèle d'un travail de modélisation, des mesures in situ ont été réalisées afin de compléter notre compréhension de la dynamique sédimentaire sur des zones peu documentées de l'estuaire. En particulier, un tripode benthique a été déployé sur le banc des ratelets (station 2 - Figure 12), principalement sableux, durant l'hiver 2018-2019. Le tripode était équipé d'un ADV Nortek 6MHz et d'un turbidimètre optique FLNTU

Wetlabs, similaires à ceux utilisés en laboratoire. L'analyse complète de ces mesures est détaillée dans le rapport du projet MORPHOSEINE.

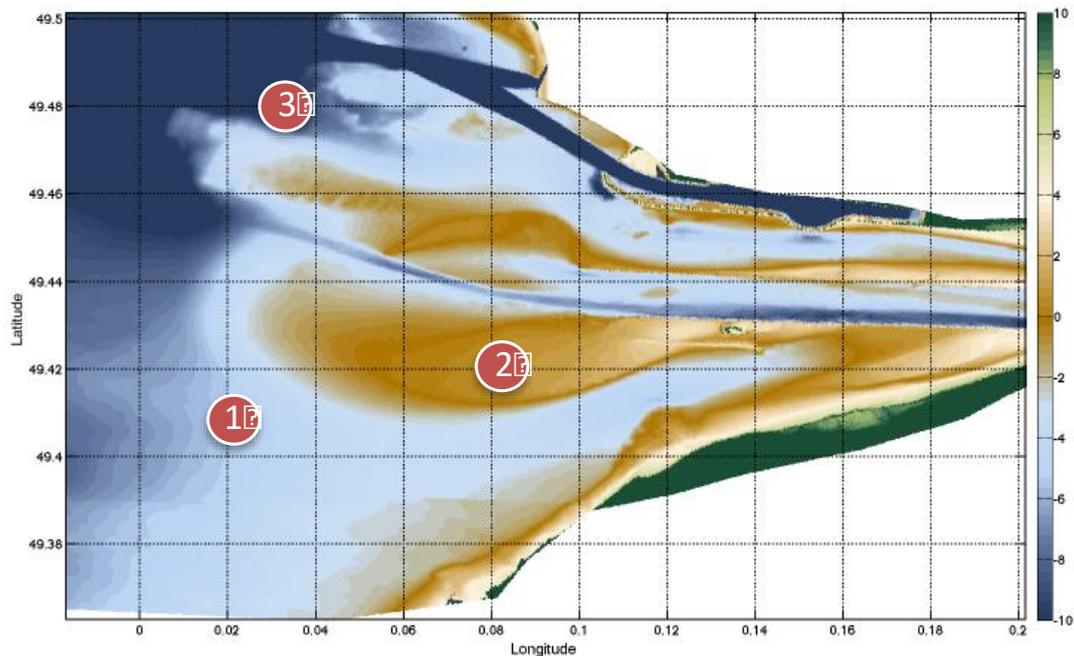


Figure 12 : Campagne de mesure du projet SA6 MORPHOSEINE : Localisation des stations : 1 : Subtidal Sud Ratelets ; 2 : Banc des Ratelets ; 3 : station SCENES. Données Bathymétriques : GIPSA

Ces données sont mobilisées ici pour évaluer le potentiel de l'indice SCI (nommé b dans le rapport MORPHOSEINE et les figures associées) pour apporter une information complémentaire dans le but de comprendre les mécanismes hydrosédimentaires (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Il faut noter ici que lors du projet MORPHOSEINE, l'indice SCI n'a pas été normalisé, contrairement aux observations en laboratoire et aux Pays Bas. Cette normalisation est possible en considérant la valeur maximale atteinte comme caractéristique de sédiments purement vaseux. Dans ce cas, un décalage de +15dB est à considérer. On peut noter que la plage de variation du SCI est identique à celle observée à Ameland, de l'ordre de 20 à 25dB.

Le début de la période de mesure, caractérisé par une première tempête en ME (wave shear stress supérieur à $1N.m^{-2}$), est associé à un indice SCI faible, traduisant une présence de sable en suspension, qui est en accord avec la signature des sédiments de surface en début de campagne. La diminution de la contrainte des vagues, associée à l'entrée en VE, implique la fin graduelle de la remise en suspension locale des sables, et une remise en suspension progressive du bouchon vaseux, et donc une augmentation progressive des sédiments fins en suspension, ce qui se traduit par un SCI en augmentation. La période de dépôt concomitante se caractériserait donc par un mélange sable/vase dont la proportion de vase augmenterait en période de VE et en absence de vague. Durant la période de temps calme qui suit, l'indice SCI reste très élevé, exprimant un sédiment en suspension toujours marqué par les sédiments fins et une faible proportion de sable. Toutefois, les valeurs de turbidité sont plus faibles que durant la première VE, la source sédimentaire n'est donc pas suffisante pour générer un dépôt fort.

Durant la première marée de la tempête (le 8 janvier), quasiment l'ensemble du dépôt frais est érodé, et l'indice SCI diminue rapidement : suite à l'érosion du dépôt sablo-vaseux, le sédiment en suspension semble être mixte sable/vase. Lors des pics de contraintes de vagues qui se succèdent, l'indice SCI reste

faible, indiquant une forte présence de sable en suspension, en particulier autour du 17 janvier. Il pourrait donc être supposé que le sédiment superficiel devienne de plus en plus sableux avec la succession des tempêtes.

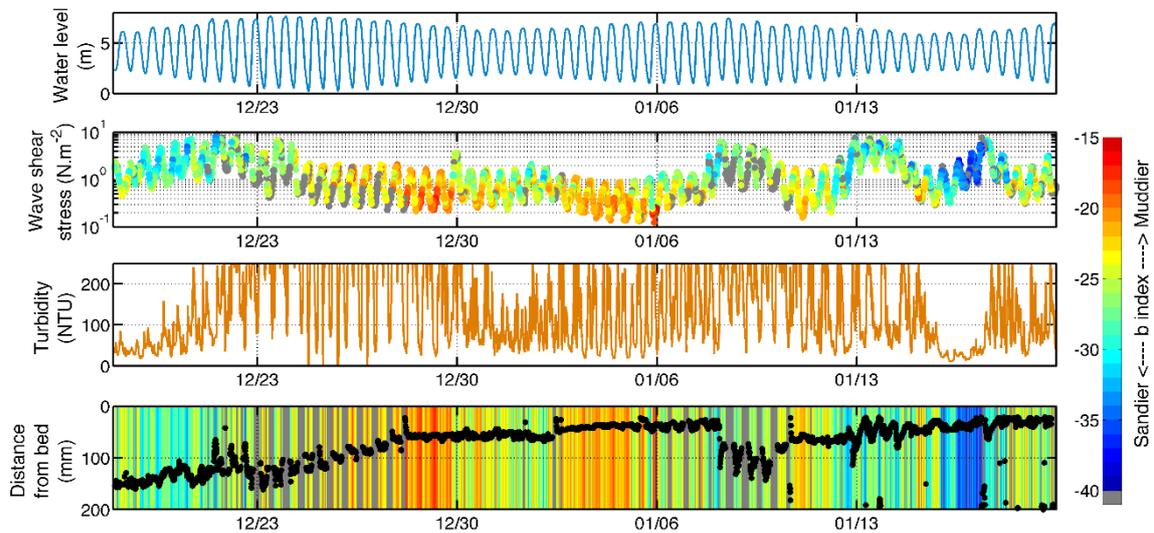


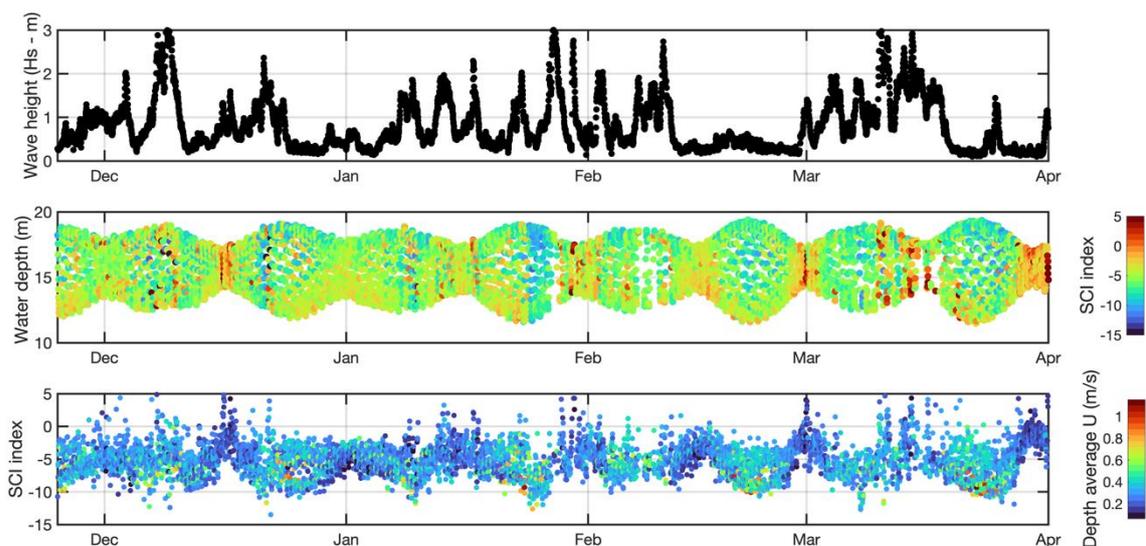
Figure 13 : Analyse de la dynamique sédimentaire sur le banc des Ratelets (station 2). Le gradient de couleur pour les panels « Wave shear stress » et « Distance from bed » correspond aux valeurs de l'indice SCI (b sur la figure) de nature des MES.

c. Embouchure de l'estuaire de Seine – Mesures SCENES

La station SCENES est déployée à l'embouchure de l'estuaire de Seine depuis octobre 2017 (point 3 - Figure 12), succédant à un déploiement test d'une station similaire (D4) entre 2015 et 2017. Elle est composée notamment d'une station de fond, équipée d'un courantomètre houlographe acoustique Nortek AWAC et d'un turbidimètre optique FLNTU Wetlabs. Nous questionnons ici la possibilité de pouvoir appliquer l'approche SCI sur ce couple de capteur. Cette application est plus complexe pour trois raisons principales :

- L'AWAC émet à 1MHz, or les études en laboratoire ont montré que cette fréquence, relativement basse, n'était pas optimale pour différencier avec précision la nature des MES ;
- L'AWAC mesure le long d'un profil dans la colonne d'eau, avec des cellules de 0.5m, mais la première cellule utilisable est positionnée autour de 1.4m au-dessus du fond, tandis que le Wetlabs, positionné sur la structure, mesure à 0.5m au-dessus du fond. A partir des mesures collectées lors des campagnes en mer, une relation de transfert très empirique a été construite de façon à estimer la valeur de la turbidité à 1.4m au-dessus du fond. Cette fonction de transfert apporte une reconstruction très discutable du gradient de turbidité proche du fond, et donc peut conduire à des incertitudes significatives sur la mesure absolue de turbidité ;
- De plus, la présence de sable en suspension diminuant avec la distance au fond, nous pourrions rencontrer plus de difficultés à identifier des différences de nature des sédiments que pour les cas d'études précédents où la mesure était réalisée plus proche du fond.

Une première approche qualitative de l'utilisation du couple ADCP/turbidimètre est cependant réalisée, de façon exploratoire. Elle a également été reprise dans Verney et al. (2024).



La

Figure 14 illustre la dynamique temporelle de l'indice SCI sur la période de Novembre 2018 à Avril 2019. On observe une réponse forte du SCI à l'échelle semi-lunaire des cycles VE/ME, avec un SCI proche de 0 en ME et un SCI très variable et plus faible (entre -5 et -10) en VE. Sur la base du concept de l'indice SCI décrit plus, haut, cette dynamique pourrait traduire des sédiments majoritairement fins présents proche du fond à l'embouchure en ME, alors qu'une fraction de sédiment sableux pourrait être présente en VE. Il est plus difficile de trouver un lien avec les épisodes de tempêtes contrairement à ce qu'il aurait pu être attendu. Le signal est bruité, avec des situations où une tempête peut induire un SCI faible, traduisant une présence significative de sable en suspension (21/22 décembre 2018 ; 8-10 janvier 2019) ou inversement une forte augmentation du SCI (16/17 décembre 2018 ; 1^{er} mars 2019). De plus amples investigations sont requises pour explorer la qualité du calcul de l'indice SCI pour ces différentes situations, afin de conclure si ces variabilités reflètent une réelle modification de la composition des MES. Il faut en effet noter que le signal acoustique rétrodiffusé utilisé ici est corrigé de l'atténuation de l'eau, mais pas du sédiment. Or, en période de fortes tempêtes, les concentrations en MES peuvent être fortes et significativement réduire l'intensité acoustique enregistrée. Cette absence de correction pourrait donc expliquer pourquoi le SCI peut rester élevé en période de tempête.

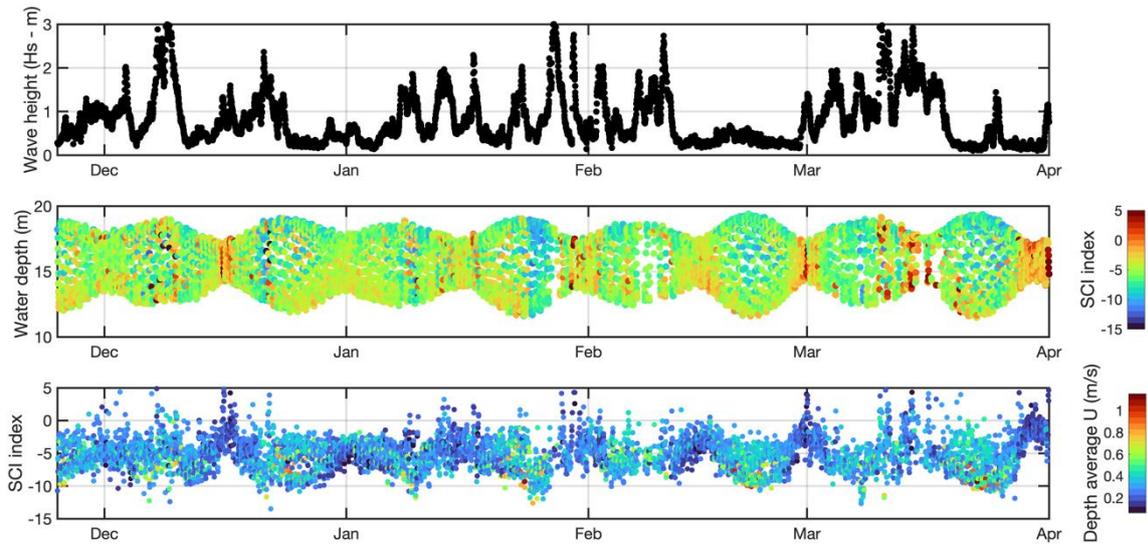


Figure 14 : Dynamique de l'indice de composition des MES (SCI Index) calculé à partir des données de la station SCENES entre Novembre 2018 et Avril 2019. Les vagues et les hauteurs d'eau sont mesurées par l'AWAC.

Il est intéressant de s'intéresser plus précisément à la variabilité de l'indice SCI à l'échelle d'un cycle VE/ME (Figure 15). La période choisie se caractérise par un temps calme, sans vagues ($H_s < 1\text{m}$), et pour des concentrations en MES globalement inférieures à 100mg/l , donc peu impactées par l'atténuation par les particules.

A l'échelle tidale, l'indice SCI est le plus faible au moment du flot et maximum autour des périodes d'étales. L'indice SCI atteint les valeurs les plus fortes à basse mer. On retrouve également clairement la dynamique VE/ME de l'indice SCI, avec des valeurs fortes en ME (entre -5 et 0) tandis qu'en VE, cet indice varie généralement entre -10 et -5. Plus globalement, une relation peut être trouvée entre l'intensité du carré des vitesses et le SCI, avec un SCI faible pour les plus forts courants (Figure 16). Cependant, cette relation reste très bruitée et son analyse demande d'être poursuivie.

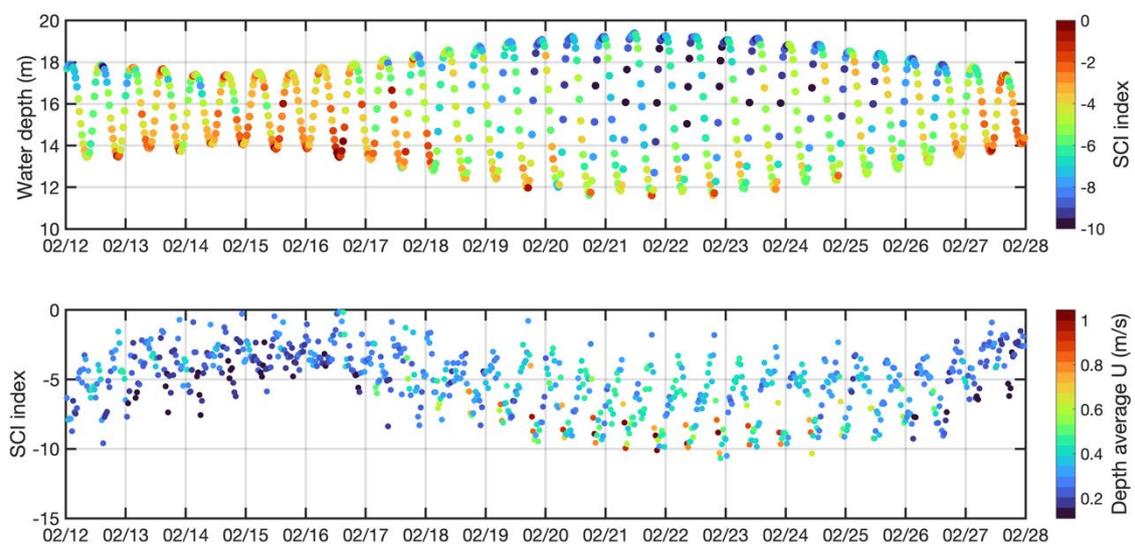


Figure 15 : Variabilité de l'indice de composition des MES SCI à l'échelle d'un cycle VE/ME en Février 2019 à la station SCENES.

Cet indice indique donc une forte variabilité de la composition et des propriétés des MES à l'échelle tidale et semi lunaire. Il reste à vérifier si cette variabilité est bien liée à la présence de sable, ou si elle traduit une modification des propriétés de MES, comme par exemple une modification de la taille des agrégats de sédiments fins. Il faut également rappeler que la fréquence acoustique de l'AWAC n'est pas optimale pour le calcul de l'indice SCI, comme démontré en laboratoire. L'ajout d'un ADV à la station de fond de SCENES courant 2024 permettra d'étudier plus avant cette dynamique.

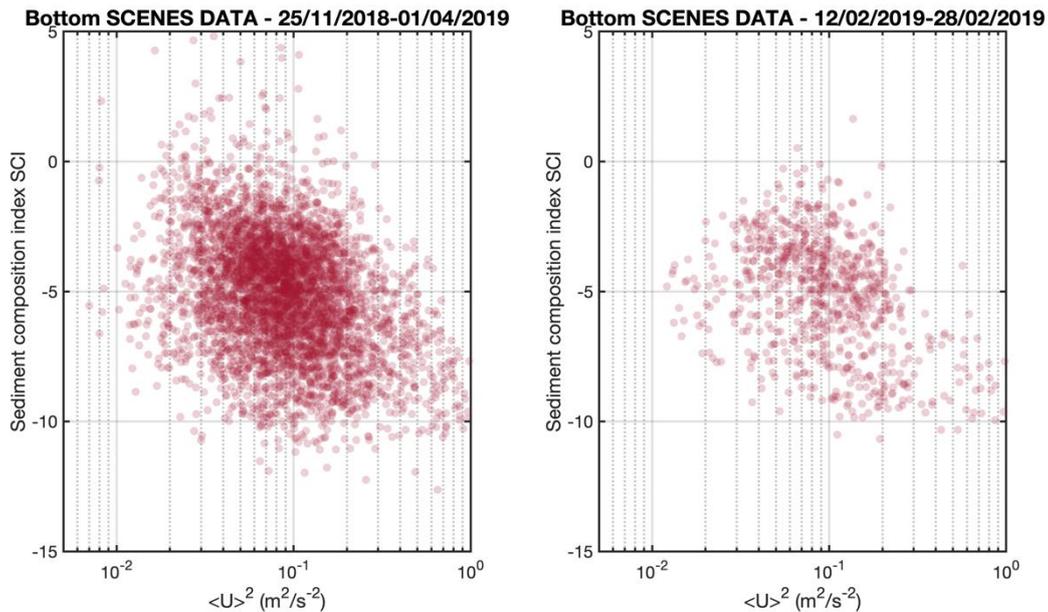


Figure 16 : Relation entre le courant quadratique moyenne sur la verticale ($\langle U \rangle^2$) et l'indice de composition du sédiment SCI pour les deux périodes illustrées précédemment.

CONCLUSION

Le concept reposant sur le couplage de capteurs optiques et acoustiques pour caractériser et quantifier les fractions de sédiment fin et de sable, et leur concentration massique, a été validé expérimentalement. Les expériences DEXMES indiquent une très forte sensibilité des résultats à la fréquence acoustique utilisée, et une très faible d'influence de la longueur d'onde optique. Pour des mélanges de sédiments et de sables inférieurs à 200 μ m, fractions principalement retrouvées en suspension, des fréquences acoustiques de 4 à 8MHz (6MHz apportant les plus faibles incertitudes, en moyenne inférieures à 30%) sont à privilégier. Cette approche a pu être appliquée sur des mesures in situ, en Seine et en mer des Wadden. Elle a permis de mieux comprendre les dynamiques hydrosédimentaires multiclassées, en lien avec les forçages de marée et de vagues.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre de façon synthétique la dynamique qui peut être observée à partir de l'indice SCI, et du calcul de la concentration en MES totale (sable et sédiments fins) à l'échelle d'une marée. Ce schéma a été construit pour l'embouchure tidale d'Ameland (Mer des Wadden), mais peut être globalement repris pour l'embouchure de la Seine (la proportion dominante de sable ou vase dépendant des conditions hydrodynamiques et hydrologiques).

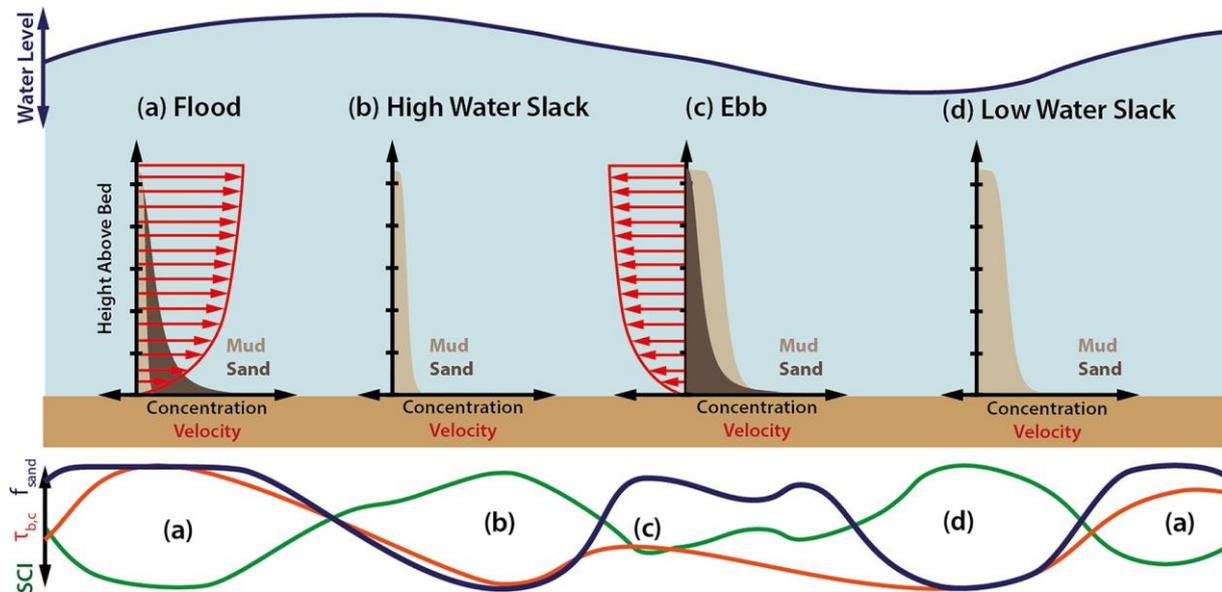


Schéma de synthèse des processus hydrosédimentaires sable/vase aux embouchures tidales de la Wadden Sea. Pearson et al., 2021

Les perspectives de ce travail sont nombreuses :

- L'application de la méthode de quantification des sédiments totaux sables et sédiments fins à partir des campagnes océanographiques
- Le déploiement d'un capteur acoustique haute fréquence sur la station SCENES, afin de valider l'indice calculé à partir de l'AWAC, et de quantifier les concentrations en MES totales
- Analyser le signal acoustique corrigé de l'atténuation par les sédiments pour explorer l'impact des tempêtes sur cet indice SCI
- L'analyse de la variabilité des signaux optiques et acoustiques sur l'ensemble de la colonne d'eau, afin d'évaluer la sensibilité de ces capteurs aux processus de floculation.

BIBLIOGRAPHIE

Druine, F., Verney, R., Deloffre, J., Lemoine, J.-P., Chapalain, M., Landemaine, V., Lafite, R., 2018. In situ high frequency long term measurements of suspended sediment concentration in turbid estuarine system (Seine Estuary, France): Optical turbidity sensors response to suspended sediment characteristics. *Marine Geology* 400, 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.03.003>

Fettweis, M., Riethmüller, R., Verney, R., Becker, M., Backers, J., Baeye, M., Chapalain, M., Claeys, S., Claus, J., Cox, T., Deloffre, J., Depreiter, D., Druine, F., Flöser, G., Grünler, S., Jourdin, F., Lafite, R., Nauw, J., Nechad, B., Röttgers, R., Sottolichio, A., Van Engeland, T., Vanhaverbeke, W., Vereecken, H., 2019. Uncertainties associated with in situ high-frequency long-term observations of suspended particulate matter concentration using optical and acoustic sensors. *Progress in Oceanography* 178, 102162. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.102162>

Pearson, S.G., Verney, R., van Prooijen, B.C., Tran, D., Hendriks, E.C.M., Jacquet, M., Wang, Z.B., 2021. Characterizing the Composition of Sand and Mud Suspensions in Coastal and Estuarine Environments Using Combined Optical and Acoustic Measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 126, e2021JC017354. <https://doi.org/10.1029/2021JC017354>

Sutherland, T. F., Lane, P. M., Amos, C. L., & Downing, J. 2000. The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness levels. *Marine Geology*, 162(2–4), 587–597. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(99\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(99)00080-8)

Verney, R., Le Berre, D., Repecaud, M., Bocher, A., Poppeschi, C., Grasso, F., 2024. Suspended particulate matter dynamics at the interface between an estuary and its adjacent coastal sea: unravelling the impact of tides, waves and river discharge from 2015-2022 *in situ* high-frequency observations. *Marine Geology*. 471, 107261. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2024.107281>



Hangar C - Espace des marégraphes - Quai de Boisguilbert
76176 ROUEN

Verney R. (coord.), Tran D., Jacquet M., 2024. *Couplage des méthodes optiques et acoustiques pour la mesure des MES. Rapport Ifremer pour le projet PHRESQUES - Volet Innovation, 26p.*

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

www.seine-aval.fr

gipsa@seine-aval.fr

Le GIP Seine-Aval est financé par

