



Rapport de recherche



PHRESQUES

Dynamique des sédiments en suspension à l'embouchure : analyse des données SCENES

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

Le projet CPIER PHRESQUES a permis, au cours de ses phases 1 et 2, la consolidation du réseau d'observation haute fréquence de l'axe Seine, de Paris à l'estuaire et jusqu'à la baie. La station SCENES, appartenant au réseau PHRESQUES et au SNO COAST-HF, a ainsi pu être déployée en octobre 2017 à l'embouchure de l'estuaire, complétant stratégiquement le réseau d'observation avec un point à l'interface entre estuaire et baie de Seine. La fin de la seconde phase du projet PHRESQUES permet de faire un bilan des observations réalisées à la station SCENES, en focalisant sur les paramètres physiques hydrosédimentaires.

La dynamique des matières en suspension, en surface et au fond, a ainsi pu être caractérisée, tout en hiérarchisant et quantifiant l'influence des forçages hydro-météorologiques majeurs : la marée, les vagues et le débit de la Seine.

Une analyse des flux sédimentaires au droit de la station a été réalisée, identifiant ici le rôle clé des mécanismes estuariens, même à l'interface, sur les imports et exports de sédiment. Ainsi, l'asymétrie des courants de marée et la circulation barocline pilotent l'import de sédiment vers l'estuaire, tandis que les tempêtes et vagues induites exportent du sédiment vers la baie. Un bilan sédimentaire pluriannuel a été réalisé, et a mis en avant la très forte variabilité interannuelle, à l'import ou l'export en fonction des apports fluviaux (eau douce et circulation barocline) et de l'intensité saisonnière des tempêtes.

Finalement, le signal haute fréquence a permis d'étudier l'impact des événements extrêmes de débit et de vagues sur la dynamique sédimentaire. Ce travail a permis d'identifier notamment l'impact des épisodes extrêmes de vagues sur la remise en suspension des sédiments et donc la concentration dans la colonne d'eau, avec un poids relatif plus important pour les événements en printemps/été qu'en hiver, malgré leur plus faible intensité.

SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE

- **Equipe 1 : Ifremer, DYNECO-DHYSED**
- **Equipe 2 : Ifremer, UMR CNRS 6523 LOPS**

Coordination scientifique : Romaric Verney

Autres chercheurs (ou équivalents) : David Le Berre, Coline Poppeschi, Florent Grasso, Guillaume Charria

REMERCIEMENTS

Nous remercions le CPIER PHRESQUES pour le financement de ce projet de recherche et d'observation, le GIP Seine Aval pour sa coordination, l'IR ILICO, le SNO COAST-HF et l'Ifremer pour le cofinancement de la station SCENES, et la Flotte Océanographique Française pour la mise à disposition des navires de recherche côtiers Thalia Et Côtes de la Manche. Merci également aux équipages de ces navires.

INTRODUCTION

La dynamique matières en suspension (MES) et les transferts sédimentaires associés sont associés directement ou indirectement à de nombreuses fonctions estuariennes et services écosystémiques. Cette dynamique est souvent observée à court terme, à l'échelle de processus tidaux, par des campagnes à la mer ou globalement via la modélisation numérique. Il existe peu d'observation assez long terme pour évaluer la dynamique hydro-sédimentaire en estuaire et faire le lien avec les forçages principaux que sont la marée, le débit du fleuve et les vagues.

L'estuaire et la baie de Seine sont un site pionnier pour l'observation physique et biogéochimique des systèmes côtiers et estuariens, avec le méta-réseau PHRESQUES et ses composantes estuariennes (SYNAPSES) et marines (Stations SMILE et SCENES – COAST-HF). Un premier travail a été réalisé sur les données SYNAPSES, présenté à différentes conférences internationales et partiellement repris dans le rapport GIPSA de 2023. Dans le cadre du projet PHRESQUES2 et des projets EC2CO RUNTIME et H2020 JERICO-S3, la dynamique de la zone d'embouchure, à l'interface entre estuaire et mer côtière, a été analysée en profondeur et valorisé via deux publications : Verney et al (2024) et Poppeschi et al. (2024).

Ce rapport reprend de façon synthétique les résultats de ces publications.

METHODOLOGIE

I. Site d'étude

La station SCENES est située à l'embouchure de l'estuaire de Seine (Figure 1), au nord du Banc d'Amfard, par 15m de profondeur (niveau moyen). Elle est déployée depuis octobre 2017 (PHRESQUES phase 1), et a pris la suite de la bouée D4, déployée dès 2015 (voir Tableau 1). En plus d'être incluse dans le réseau régional PHRESQUES, la station SCENES est intégrée au Service National d'Observation COAST-HF, rassemblant les stations de mesure haute fréquence le long des côtes métropolitaines.

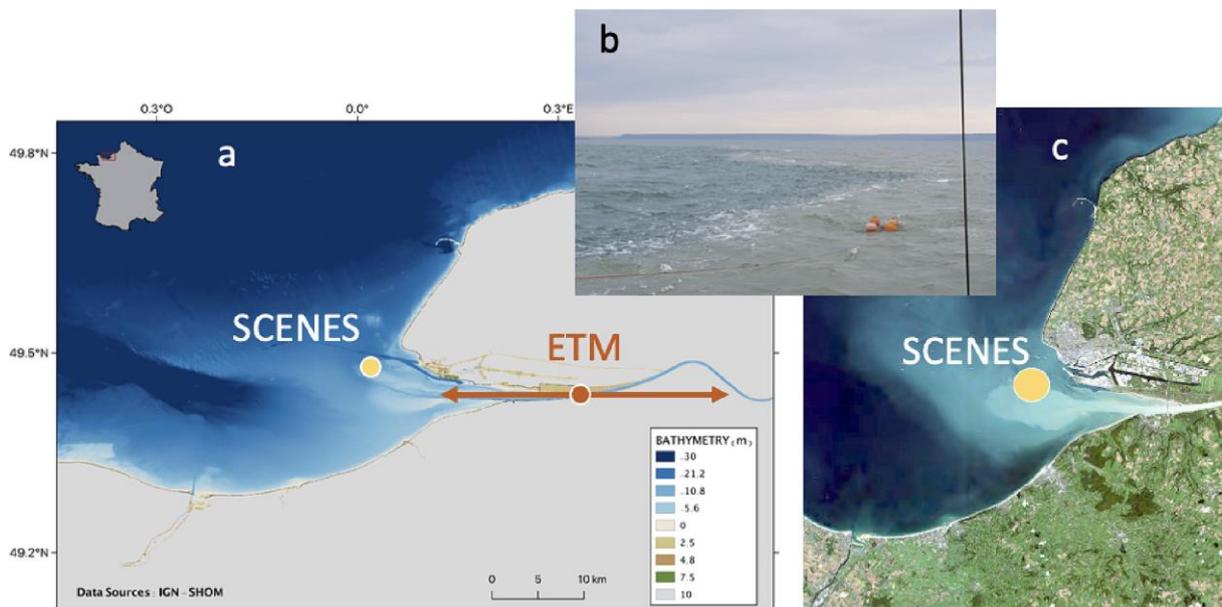


Figure 1 : Estuaire et baie de Seine : bathymétrie et positionnement de la station SCENES (a) ; photographie du front du panache turbide à la station SCENES (b) et image Landsat8 du panache turbide de surface.

Tableau 1 : Coordonnées des bouées de signalisation, de la bouée SCENES et de la station de fond. La position de cette dernière est approximative car plusieurs fois déplacée pour maintenance.

	Positionnement du mouillage SCENES	
GBR1	49°28.850'N	0°1.848'E
GBR2	49°28.801'N	0°1.879'E
SCENES	49°28.844'N	0°1.932'E
Station de fond	49°28.836'N	0°1.908'E

Comme illustré par la photographie en Figure 1, la station SCENES est directement sous l'influence du fleuve, avec notamment la sortie des eaux saumâtres et chargées en sédiment en surface en provenance de l'estuaire. Chapalain et al (2019) ont réalisé de nombreuses campagnes de mesure au point fixe, observant la dynamique hydro-sédimentaire à proximité de la station SCENES à l'échelle de la marée (Figure 2). En vive eau, comme celle du 22 Juillet 2016, les courants de flot sont intenses, atteignant 1m/s, suivi en début de pleine mer par un courant orienté Nord dû à la propagation de la marée en Manche. Les courants de jusant sont moins marqués, de l'ordre de 0.5m/s. La sortie des eaux de l'estuaire en baie induit une stratification en surface, sur plusieurs mètres de profondeur. La situation de Juillet 2016 est atypique car elle suit l'événement extrême de crue de fin Juin 2016, dépassant les 2000m³/s. Ce panache dessalé de surface est également chargé en matières en suspension (entre 10 et 20mg/l), principalement visible autour de l'étales de basse mer. Les courants de marée, et notamment au flot, remettent en suspension de grande quantité de sédiments, dépassant les 50mg/l. Dans le contexte hydrologique du 22 Juillet 2016, l'intensité du mélange ne permet pas une homogénéisation de la colonne d'eau : les sédiments remis en suspension se distribuent sur la première moitié de la colonne d'eau. Le courant Nord (courant de Verhaule) autour de la pleine mer induit également une augmentation de la concentration en MES, possiblement dû à une advection des sédiments en suspension en provenance du chenal de navigation, éventuellement accompagné d'une érosion locale.

Les forçages impliquent également une réponse dynamique des caractéristiques des matières en suspension, via une modulation des processus de floculation : lors des épisodes intenses de courant, la turbulence est importante et fragmente les agrégats composant les MES, se traduisant par des floccs de petite taille, de l'ordre de 50µm. Lors des étales de courant, les conditions hydrodynamiques sont favorables aux processus d'agrégation et génèrent des floccs de grande taille, caractérisé par des diamètres médians supérieurs à 200µm.

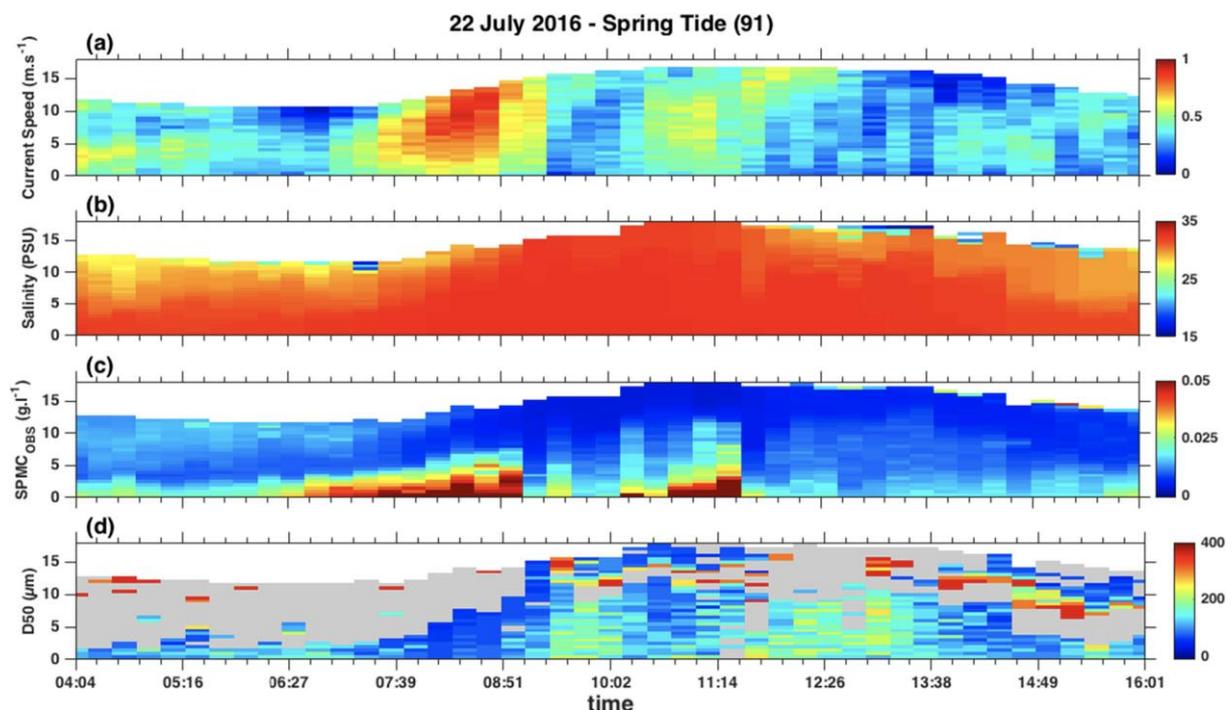


Figure 2 : Série temporelle de la vitesse du courant (a) ; de la salinité (b) ; de la concentration en MES (c) et du diamètre médian des particules en suspension (d). Cycle de marée du 22 juillet 2016. Issu de Chapalain et al., 2019

Les campagnes en mer permettent d'observer en détail la dynamique verticale des MES, mais seulement sur quelques cycles de marée. L'analyse des données haute fréquence de la bouée SCENES va permettre de compléter cette analyse de l'échelle de la marée à l'échelle inter-annuelle.

II. Station SCENES

La bouée SCENES (Station Côtière pour l'observation de l'ENvironnement en Estuaire de Seine) est une bouée scientifique propriété de l'Ifremer et équipée de capteurs observant différents paramètres de l'environnement estuarien (salinité, température, turbidité, fluorescence, courant, vagues). Elle est constituée de trois éléments distincts : une bouée de surface, une station de fond et deux bouées complémentaires de signalisation (Figure 4).

1. Bouée de Surface

La bouée SCENES et son mouillage sont une copie de la bouée SMILE déjà déployée en Baie de Seine au large de Luc sur Mer.

La bouée de surface est une ancienne bouée MAREL déployée en estuaire de Seine dans les années 2000. Pour rappel, ses dimensions hors tout sont 3.6m de diamètre et 6.6m de haut (Figure 3). Le flotteur en lui-même a une dimension de 3.6m de diamètre et 3.1m de haut, sur lequel se fixe une superstructure constituée d'un portique de 2.2m de hauteur accueillant outre les équipements scientifiques les éléments de signalisation réglementaires : croix de Saint André, réflecteur radar et feu de signalisation (rythme SADO 5 éclats toutes les 20s).

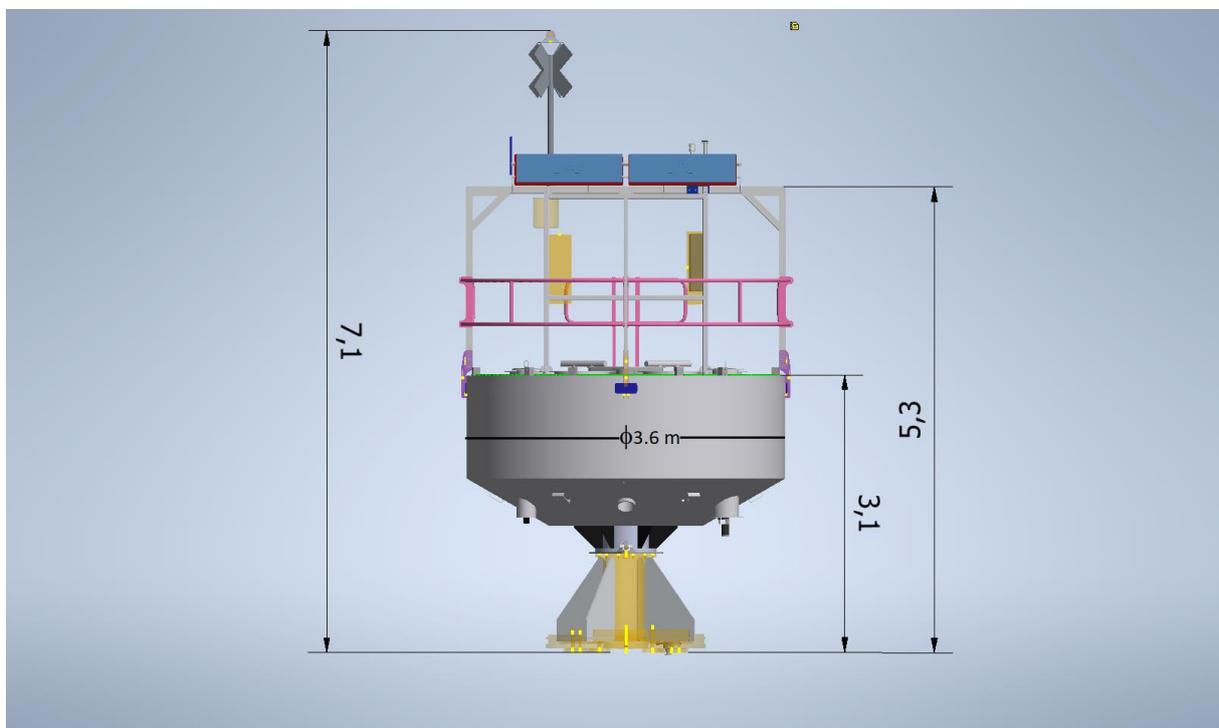


Figure 3 : Présentation de la bouée SCENES (après modification 2021 portique et rampardes) – dimensions principales

La bouée de surface accueille une station météo, une sonde HYDROCAT (Seabird - mesure de salinité, température, pression et oxygène dissous) et une sonde mesurant la turbidité et la fluorescence (Wetlabs FLNTU) équipée d'un balai cuivré pour limiter l'influence des biosalissures. Les mesures CTD et FLNTU sont réalisées entre 1m et 1.5m sous la surface toutes les 15min.

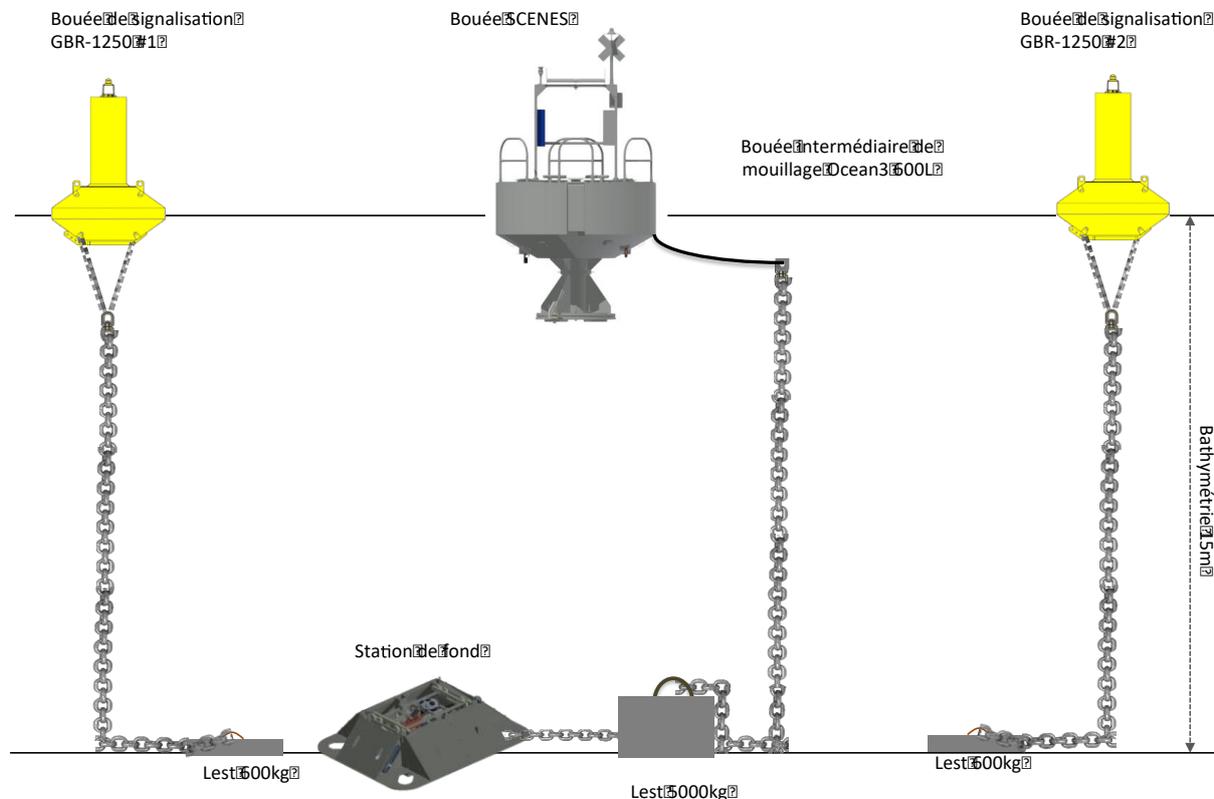


Figure 4 : Schéma général du mouillage SCENES – vue en coupe

2. Station de fond

La station de fond est constituée d'une structure principale pyramidale accueillant un panier contenant l'instrumentation (Figure 5). Ce panier est actuellement relevé par plongeur tous les 3 à 4 mois hors circonstances exceptionnelles (e.g. période COVID ou période hivernale longue et intense).

Le panier contient un courantomètre acoustique à effet doppler AWAC, mesurant le profil vertical des vitesses du courant et de l'intensité acoustique rétrodiffusée toutes les 30min (première cellule à 1.4m au-dessus du fond, cellules de 0.5m ensuite). L'AWAC mesure également les caractéristiques de vagues, toutes les heures.

Un capteur de turbidité (NTUSB, Wetlabs) est également positionné dans le panier de fond, à environ 0.5m au-dessus du fond à partir de Octobre 2017, et à 1.4m au-dessus du fond entre Janvier 2015 et Juin 2017. Ces mesures sont concomitantes aux mesures de courant par l'AWAC.

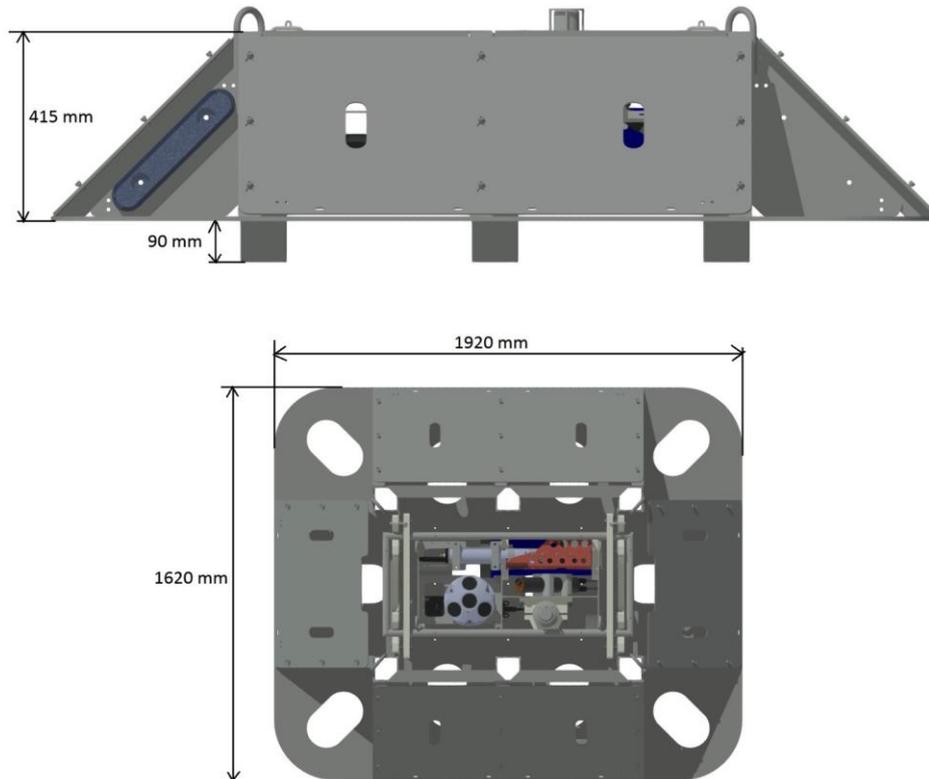


Figure 5 : Schéma de la station de fond SCENES

III. Données complémentaires

Pour l'analyse des données SCENES, des données complémentaires sont essentielles. Le marégraphe du Havre et les prévisions du SHOM (<http://datashom.fr>) apportent les informations sur les caractéristiques de marée (heures de pleine et basse mer, marnage). Le débit de la Seine est mesuré quotidiennement à la station de Vernon, en amont de Poses et à 200km de l'embouchure (www.hydro.eaufrance.fr). Sur la base du rapport Artelia (2019), un temps moyen de propagation du débit de 5 jours est considéré.

Les données de vagues mesurées par l'AWAV ne sont pas continues, du fait d'incidents sur les capteurs ou de rotations tardives dues à des contraintes météorologiques. Afin de garder une information homogène sur l'ensemble de la série de mesure, les données issues des simulations opérationnelles WaveWatch3 sont extraites au point le plus proche de la station SCENES. Ces données sont disponibles toutes les heures via le portail MARC (<https://marc.ifremer.fr>). Ces données sont ensuite réduites par marée en calculant par exemple le percentile 90 de la hauteur significative des vagues (H_{sP90}).

47 campagnes en mer ont été réalisées depuis 2015, approximativement tous les 3 à 4 mois sauf en 2016 où elles avaient lieu tous les 2 mois. Ces campagnes permettent l'acquisition de profil de courant, de salinité, température, turbidité toutes les 30min minimum pendant un cycle de marée (voir Chapalain et al., 2019) et servent de mesures de référence pour la station SCENES. Des prélèvements en surface et près du fond permettent de caractériser les MES, et notamment de mesurer la concentration massique.

IV. Traitement des données

Le protocole complet du traitement effectué sur les données est détaillé dans Verney et al (2024) et Poppeschi et al. (2024). Seules les étapes sont rappelées ci-dessous.

Lors des campagnes en mer, un capteur de turbidité identique aux capteurs déployés sur la bouée (surface et fond) était installé sur la cage instrumentée. Les mesures et prélèvements ont permis de calculer une relation de calibration en turbidité et concentration en MES telle que :

$$SPMC = 0.00156 * NTU + 0.001$$

Les données de turbidité de fond ne sont pas mesurées à la même distance du fond avant et après octobre 2017. De plus, la première cellule de l'AWAC est située à 1.4m au-dessus du fond. Dans l'objectif d'utiliser l'intensité acoustique rétrodiffusée pour calculer des flux sédimentaires sur l'ensemble de la colonne d'eau, une fonction de transfert permettant d'évaluer la turbidité à 1.4m au-dessus du fond à partir des données à 0.5m est recherchée (Figure 6) :

$$Turb_{1.4mab} = \min\left(0.7 * e^{\frac{10 - Turb_{0.5mab}}{40}} + 0.3; 1\right) * Turb_{0.5mab}$$

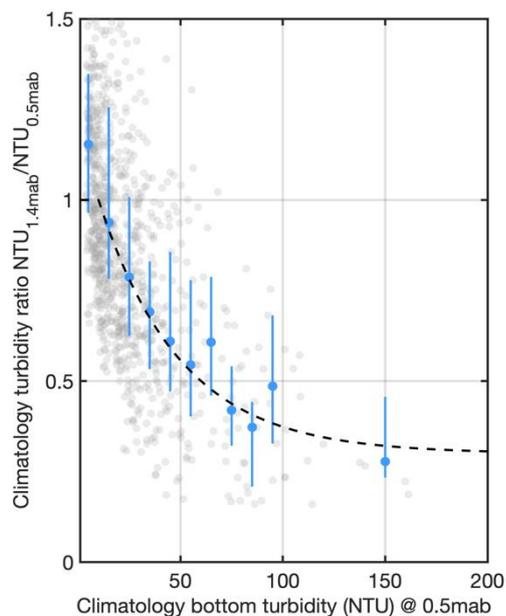


Figure 6 : Fonction de transfert entre mesures de turbidité à 0.5m et 1.4m au-dessus du fond calculée en comparant les climatologies tidales par classe de marnage entre les deux périodes.

Le signal acoustique rétrodiffusé mesuré par l'AWAC peut également être utilisé pour estimer la concentration en MES, à la fois près du fond, mais plus intéressant dans l'ensemble de la colonne d'eau. Cette évaluation nécessite de corriger le signal acoustique de la divergence sphérique, de la géométrie du faisceau et de l'atténuation du son par l'eau et les concentrations en matières en suspension, via l'utilisation de l'équation du sonar (Fettweis et al., 2019 ; Tessier et al., 2008). Dans ce travail, nous avons utilisé la méthode proposée par Thorne et al (2014), calculant un diamètre équivalent optique-acoustique ($D50_{opt-acc}$) comme paramètre de calibration en comparant mesure de concentration au fond

issue du turbidimètre et signal acoustique corrigé. Ceci permet notamment de compléter le signal de concentration en MES lorsque les capteurs optiques sont saturés (Figure 7).

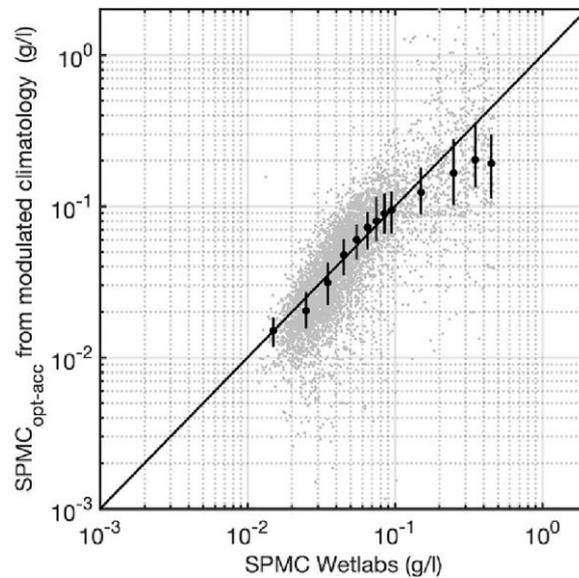


Figure 7 : Comparaison des concentrations en MES au fond calculées à partir du turbidimètre optique et du signal acoustique calibré (points gris). Les points noirs indiquent la médiane par classe de concentration, et les barres verticales les percentiles 25 et 75. La ligne noire continue indique la droite 1:1

A partir des mesures issues des campagnes en mer, nous avons pu estimer une extrapolation du paramètre de calibration $D50_{opt-acc}$ sur l'ensemble de la colonne d'eau. Cette méthode permet de calculer les concentrations en MES de la surface au fond. Ces concentrations estimées par AWAC sont très bien corrélées aux mesures de référence obtenues lors des campagnes en mer (Figure 8).

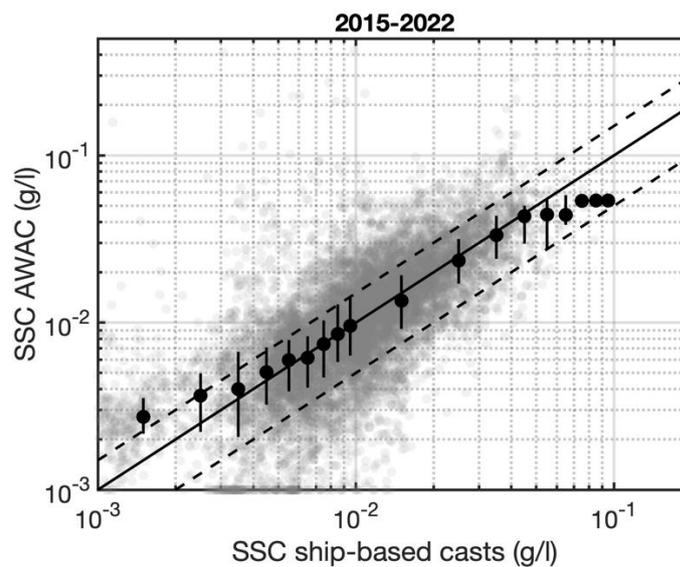


Figure 8 : Comparaison des concentrations en MES dans la colonne d'eau calculées à partir du signal acoustique rétrodiffusé et des profils optiques réalisés à partir des campagnes en mer (points gris). Les points noirs indiquent la médiane par classe de concentration, et les barres verticales les percentiles 25 et 75. La ligne noire continue indique la droite 1:1 et les lignes tiretées l'intervalle à +/-50%

RESULTATS

V. Dynamique des MES à l'embouchure de l'estuaire de Seine – vue globale

L'ensemble des données de salinité et de concentration en MES disponibles à la station SCENES entre 2015 et 2022 sont illustrées Figure 9. Cette période couvre des années hydrologiquement variées, avec des années humides (2018 ; 2020 voir dans une moindre mesure 2021) et sèches 2015 ; 2017 ; 2019 ; 2022. 2016 est une année atypique avec une crue exceptionnelle en juin/juillet 2016 atteignant plus de $2000\text{m}^3/\text{s}$.

Un premier élément marquant de la Figure 9 est la forte discontinuité des mesures à SCENES. En surface, un épisode exceptionnel de houle a détruit la structure aérienne de la bouée en janvier 2019. La remise en état de la bouée a duré plus d'un an, et sa remise à l'eau a été largement perturbée par le covid en 2020. Au fond, les données sont moins fragmentées, l'absence de données s'expliquant par un envasement de la station fin 2019 puis par des rotations complexes à programmer en 2020 et 2021. Ce retour d'expérience nous a amené à lancer une réflexion sur les vecteurs à déployer et sur la stratégie de maintien en condition opérationnelle à mettre en œuvre à partir de 2025.

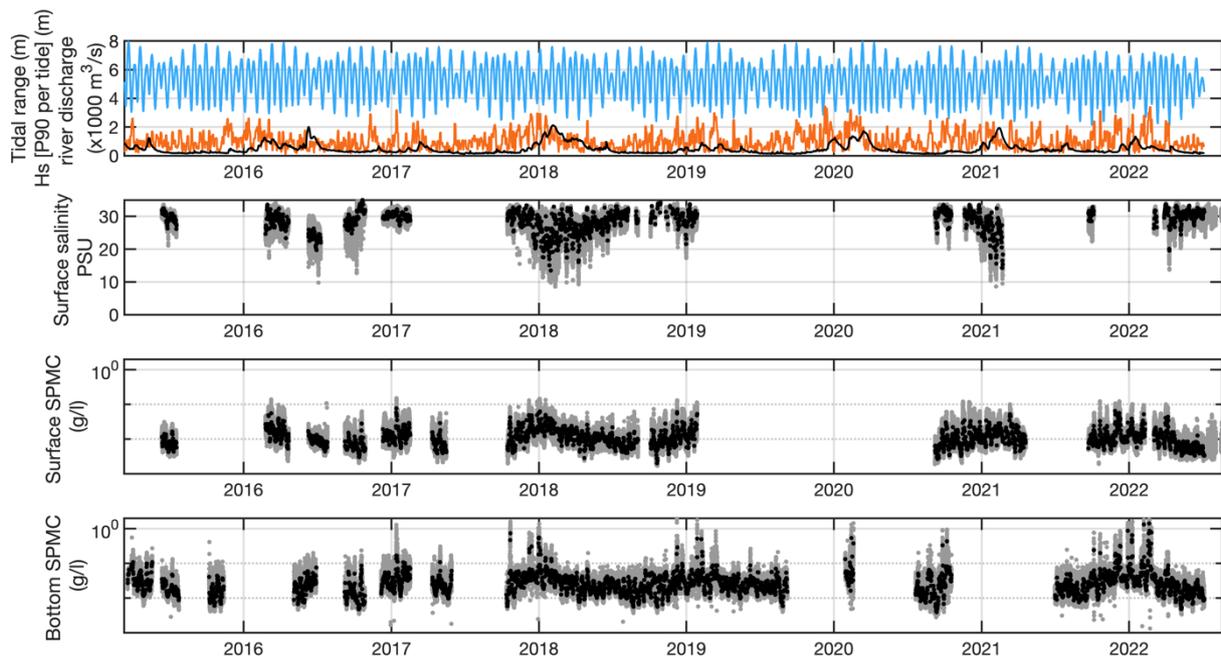


Figure 9 : Variabilité des forçages hydro-météorologiques, de la salinité de surface et des concentrations en MES en surface et au fond à la station SCENES sur la période 2015-2022. Les points gris correspondent à la haute fréquence, les points noirs illustrent les données médianes par marée.

Les observations sur le long terme permettent toutefois de bien identifier macroscopiquement l'influence des différents forçages : marée, débit, vagues. Nous pouvons quantifier l'influence du débit sur la salinité de surface, avec des valeurs médianes par marée autour de 30PSU par faible débit,

pouvant descendre jusqu'à 10PSU par très fort débit. La variation intra-tidale est également forte (points gris), allant de 5PSU par faible débit et atteignant plus de 20PSU pour des débits supérieurs à $1500\text{m}^3/\text{s}$.

Les concentrations en MES sont globalement plus faibles en surface (en moyenne autour de 10mg/l , et variant de quelques mg/l à près de 100mg/l ponctuellement) qu'au fond (variant entre 10 et 100mg/l , pouvant dépasser 1000mg/l ponctuellement). Au-delà des variations à l'échelle de la marée que l'on ne peut que deviner à cette échelle via la distribution des valeurs hautes fréquences (points gris ; Figure 9), ces concentrations en MES répondent principalement à la variation saisonnière des forçages, avec des concentrations plus fortes en hiver (période de fort débit et fortes vagues) et plus faibles en été en période d'étiage et en absence de tempêtes.

Les parties suivantes vont s'attacher à détailler les effets respectifs de la marée, du débit et des vagues.

VI. Influence de la marée sur la dynamique des MES à l'interface entre estuaire et baie

1. Marée et hydrodynamique à l'embouchure

Avant de préciser l'influence de la marée sur les concentrations en MES, nous devons expliciter son influence sur l'hydrodynamique et la stratification, deux moteurs essentiels de la dynamique des sédiments et des flux à l'embouchure.

L'intensité des courants de marée (ici barotrope) est évidemment fortement contrôlée par le marnage (tidal range, TR ci-après), avec des courants maximums au flot de l'ordre de 0.2m/s en morte eau (ME - TR compris entre 2 et 3m) augmentant jusqu'à 0.6m/s pour des marnage moyens (TR compris entre 5 et 6m) et atteignant 0.9m/s en vive eau (TR > 7m - VE) (Figure 10).

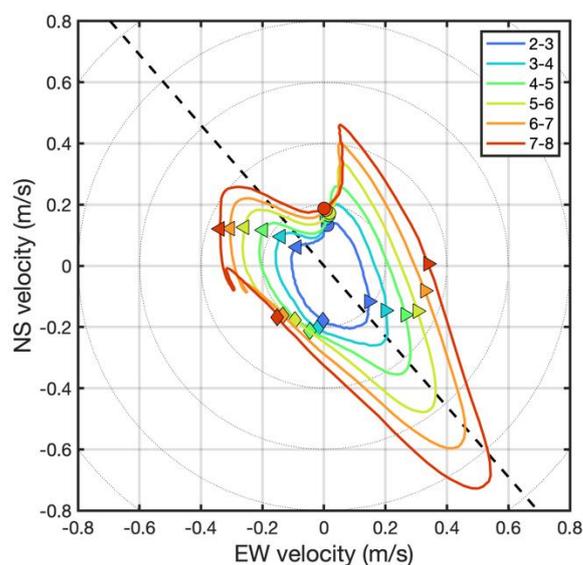


Figure 10 : Ellipse du courant barotrope à l'échelle de la marée par classe de marnage (couleur) mesuré à la station SCENES. Losange : basse mer ; Rond : pleine mer ; triangle droite et gauche respectivement +3h et -3h autour de la basse mer. Les cercles concentriques grisés indiquent l'amplitude du courant par pas de 0.2m/s

On peut également noter une forte dominance du flot par rapport au jusant, et la présence d'un courant s'orientant NE-N 3h après la basse mer et jusqu'à l'étale de pleine mer, atteignant 0.4m/s en VE. Ce courant, nommé courant de Verhaule, est généré par la propagation de la marée en Manche.

Cette hydrodynamique très variable impacte le mélange vertical, et combiné avec l'influence du débit contrôle la stratification verticale à l'embouchure (Figure 11). Une salinité moyenne de fond a été calculée à partir des mesures CTD lors des campagnes en mer à SCENES entre 2015 et 2022, i.e. 32.5PSU. Par débit moyen (Q entre 300 et 500m³/s), la stratification est faible (inférieure à 3PSU de différence entre la surface et le fond) et s'intensifie en ME, en raison d'un faible mélange vertical induit par les courants de marée. Cette stratification diminue pour les très faibles débits d'étiage, et s'intensifie fortement avec l'augmentation du débit. Pour des débits supérieurs à 1000m³/s, la stratification verticale se caractérise par une différence de salinité de presque 6PSU en VE et dépasse 10PSU en ME.

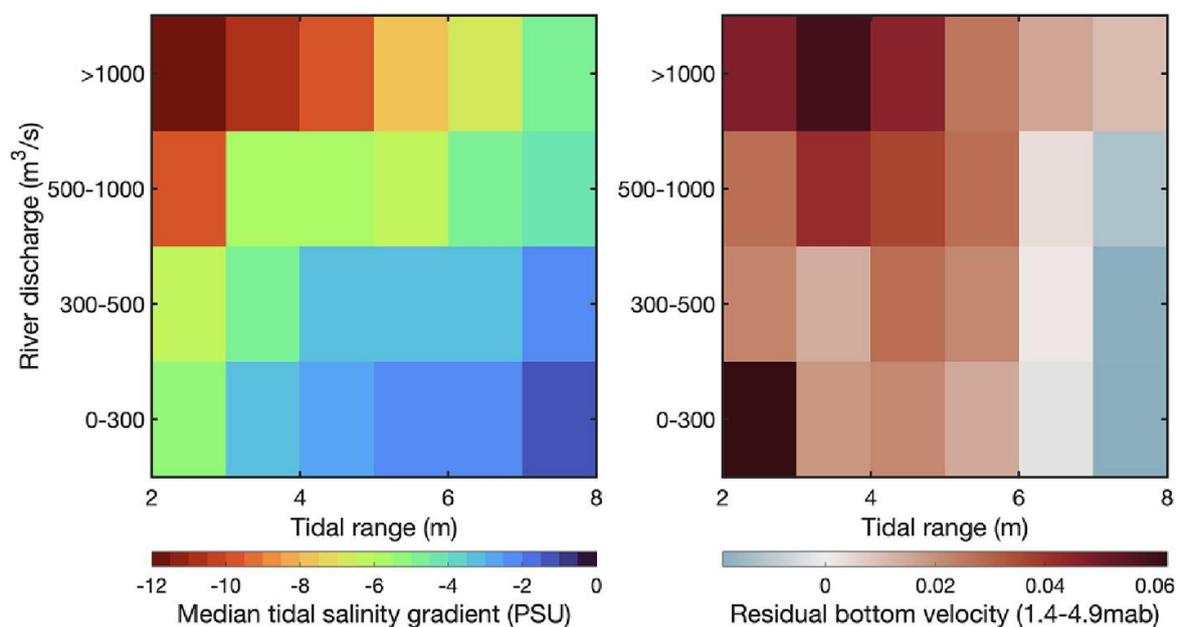


Figure 11 : Gradient vertical (surface-fond) de salinité médian par marée (gauche) et flux résiduel de courant au fond (entre 1.4 et 4.9m au-dessus du fond) (droite) par conditions de marnage et de débit.

Cette stratification plus intense se traduit par une activation de la circulation barocline (Figure 11) : pour de très faibles niveaux de stratification, la circulation résiduelle au fond est faible voire négative (i.e. dirigée vers la baie). L'augmentation de la stratification inverse cette tendance, avec une vitesse résiduelle dirigée vers l'estuaire pour des gradients supérieurs à 5PSU, pouvant dépasser 0.05m/s en période de ME et fort débit. Le courant résiduel n'est toutefois pas parfaitement corrélé avec le gradient vertical de salinité : un marnage très important contribue à un résiduel dirigé vers l'aval pour une stratification de l'ordre de 5PSU, tandis qu'en ME une stratification de quelques PSU suffit pour générer une circulation barocline orientée vers l'amont.

2. Influence de la marée et des courants associés sur la variabilité intra-tidale de la concentration en MES

La marée est le moteur principal de l'estuaire, comme illustré ci-dessus avec la dynamique des courants de marée et Figure 9 sur le signal de concentration en MES. Toutefois, à cette échelle il est complexe de rendre de compte quantitativement de son impact sur la variation intra-tidale des niveaux de concentration en MES.

Dans cet objectif, le signal haute fréquence de concentration en MES a été découpé par cycle de marée, de basse mer à basse mer, et caractérisé par son marnage, son débit associé et l'intensité des vagues (via le H_{sP90}). Chaque signal tidal a été regroupé par condition de marnage, débit et vague, et moyenné pour obtenir un signal moyen intra-tidal de concentration en MES. Pour évaluer l'impact du marnage seul, nous avons isolé les marées à faible H_{sP90} ($H_{sP90} < 1\text{m}$) et pour des débits moyens (compris entre 300 et 500 m^3/s), comme présenté Figure 12. Les marées considérées ont été différenciées entre déchet et revif pour analyser d'éventuelles différences.

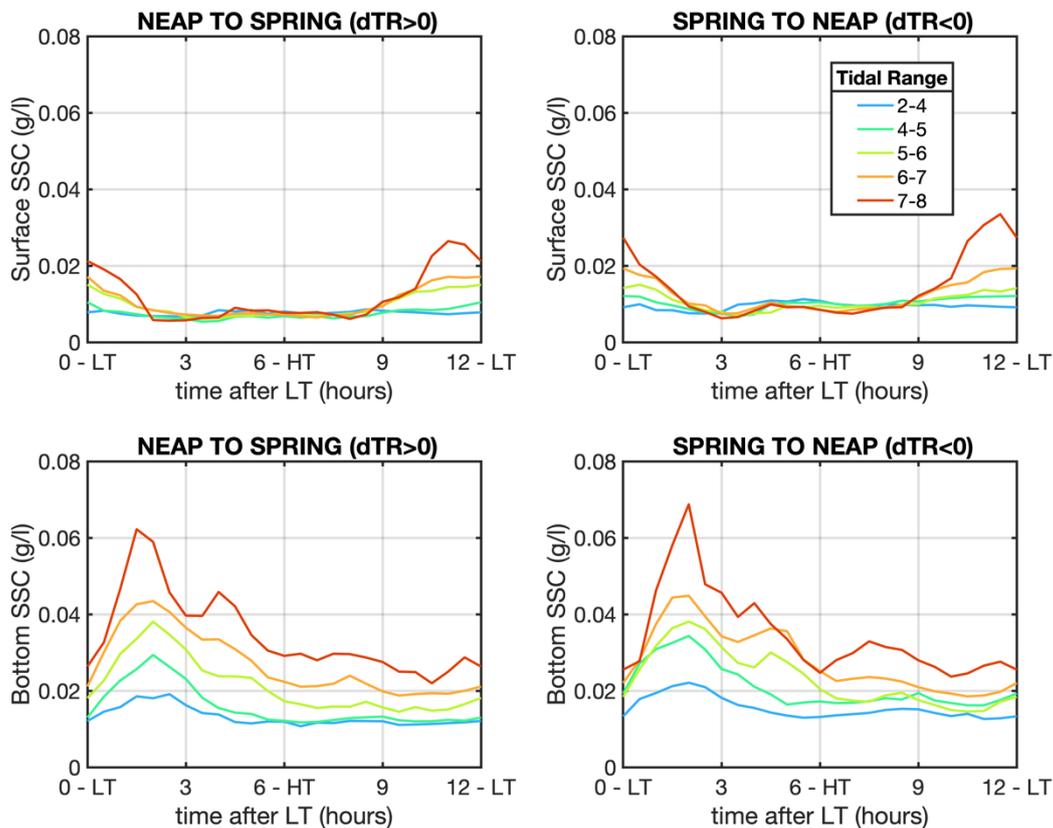


Figure 12 : Climatologie de la concentration en MES par classe de marnage en surface (haut) et au fond (bas) et revif (gauche) et déchet (droite). Seules les marées où $H_{sP90} < 1\text{m}$ sont considérées.

On retrouve de façon claire la différence de niveau de concentration en MES entre le fond, plus concentré, et la surface. En surface comme au fond, le niveau de concentration en MES croit avec le marnage, passant en moyenne de 5mg/l en ME à près de 30mg/l en VE en surface, et de 10mg/l à

60mg/l au fond. Les différences se retrouvent également sur les différentes phases de la marée où la concentration en MES est la plus forte. Au fond, le maximum de concentration est observé au flot, concomitant avec le pic de vitesse de courant (autour de 1h30 après la basse mer). En surface, le pic de concentration intervient autour de la basse mer, en lien avec la sortie des eaux chargées de l'estuaire dans la couche stratifiée de surface. L'effet du marnage est donc différent entre surface et fond : au fond, il s'agit d'un lien direct, contrôlé par une remise en suspension locale des sédiments. En surface, il s'agit d'un effet distant, un fort marnage impliquant une plus forte remise en suspension du bouchon vaseux à l'intérieur de l'estuaire et donc des eaux plus chargées en MES sortant à basse mer de l'estuaire vers la baie.

VII. Évaluation de l'influence du débit et des vagues sur la dynamique à l'embouchure

Nous avons vu que la marée, en moyenne, contrôlait une forte part de la variabilité du signal de concentration en MES à l'embouchure. Afin de mieux identifier le rôle des deux autres forçages (débit et vagues), nous allons dans un premier temps nous attarder sur la variabilité de la concentration médiane par marée pour différentes conditions de marée, débit et vague (Figure 13).

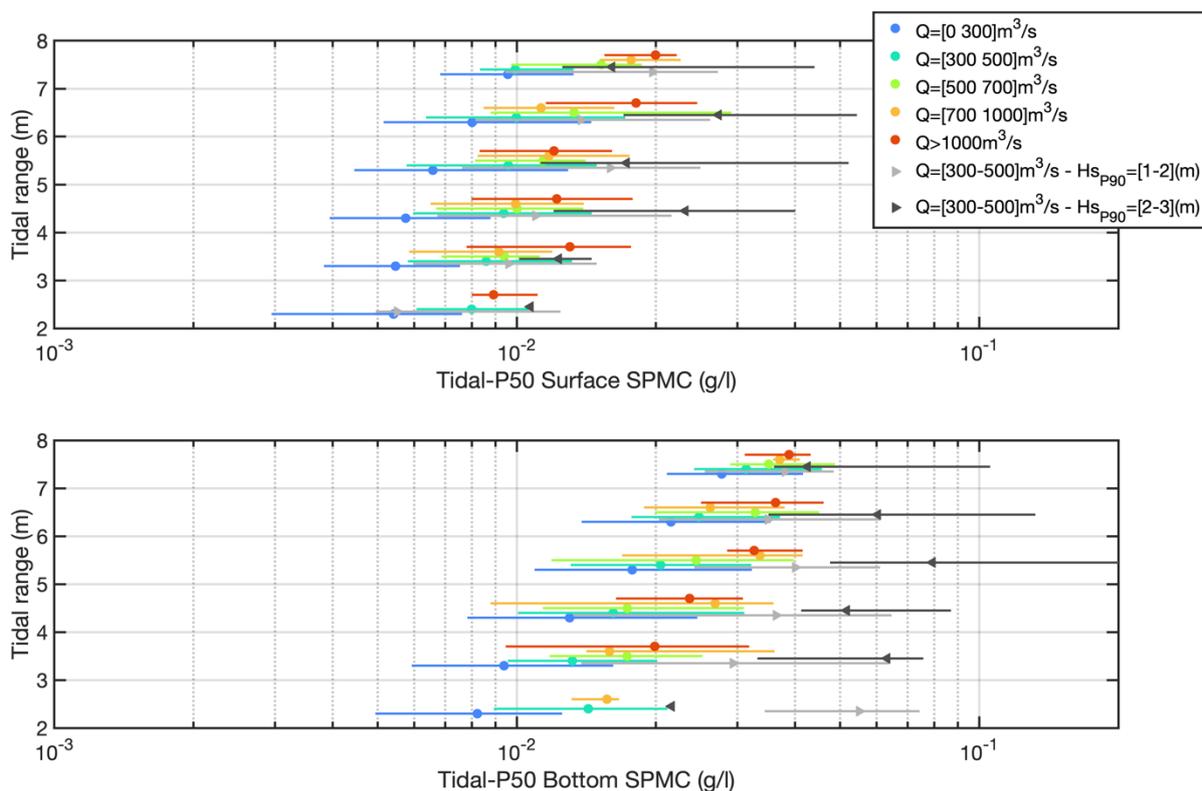


Figure 13 : Influence du marnage, du débit et des épisodes de vagues sur la concentration médiane par cycle de marée à la station SCENES. Les marqueurs indiquent les valeurs médianes par classes de conditions, et les lignes les percentiles 10 et 90 des distributions. Les ronds correspondent à des marées sans vagues ($H_{s_{P90}} < 1m$). Les conditions de vagues (triangles) ne sont illustrées que pour des débits moyens, i.e. compris entre $300 m^3/s$ et $500 m^3/s$.

Pour un débit moyen, sans vagues ($H_{sP90} < 1\text{m}$), nous retrouvons l'influence du marnage, la concentration en MES médiane par marée augmentant avec l'amplitude de la marée. Pour un marnage donné, l'augmentation du débit se traduit par une augmentation de la concentration médiane, principalement du fait de la translation du bouchon vaseux vers l'aval. Par exemple, pour un marnage moyen entre 5 et 6m (sans vague), la concentration en MES au fond passe de moins de 20mg/l ($Q < 300\text{m}^3/\text{s}$) à plus de 30mg/l ($Q > 1000\text{m}^3/\text{s}$). En surface, pour des conditions similaires, la concentration augmente de 8mg/l à près de 15mg/l.

A cette influence du débit se rajoute l'action des vagues : pour un débit moyen compris entre 300 et 500 m^3/s , pour un marnage compris entre 4 et 5m, la concentration en MES de fond sans vague est de l'ordre de 15mg/l. Des épisodes de vagues (H_{sP90}) compris entre 1m et 2m génèrent une érosion des sédiments de fond et donc une augmentation de la concentration atteignant 35mg/l en médiane et pouvant dépasser 60mg/l. Des épisodes encore plus intenses ($H_{sP90} > 2\text{m}$) induisent des concentrations de MES médianes par marée au fond supérieures à 50mg/l et atteignant les 90mg/l. Considérant l'ensemble des épisodes de tempêtes, les plus intenses génèrent des concentrations dépassant largement 100mg/l. L'effet des vagues induit donc ponctuellement des concentrations jusqu'à un ordre de grandeur plus importantes qu'en absence de vagues, alors que l'effet du débit (entre étiage et crue) induit une augmentation des concentrations en MES d'un facteur 2 à 3. Le même comportement est observé en surface, avec toutefois des valeurs atteintes quantitativement plus faibles qu'en surface.

Dans le but de préciser encore mieux l'influence du débit et des vagues, nous allons ensuite travailler avec les anomalies de concentration. Les anomalies sont calculées à partir des signaux haute fréquence (Figure 9) et de la climatologie par condition de marnage pour des marées sans vagues ($H_{sP90} < 1\text{m}$) et un débit moyen compris entre 300 et 500 m^3/s (Figure 12). Un signal climatologique marée seule est interpolé sur le temps des observations haute fréquence, et est retranché au signal brut (Figure 14).

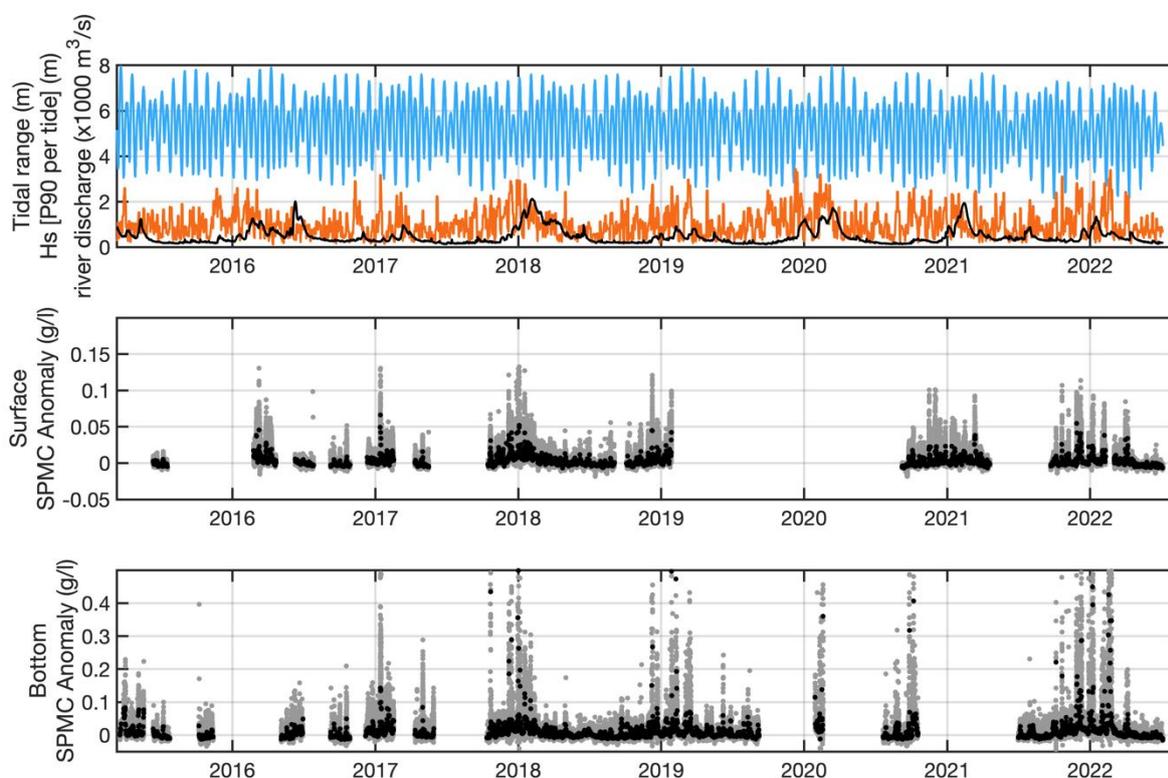


Figure 14 : Variabilité des forçages hydro-météorologiques et des anomalies de concentration en MES en surface et au fond sur la période 2015-2022 à la station SCENES

Ainsi, en période de débit moyen et sans vagues, les anomalies de surface et de fond varient faiblement autour de 0. On observe également de fortes anomalies positives en hiver, de plusieurs centaines de mg/l au fond et plusieurs dizaines de mg/l en surface, et des anomalies légèrement négatives en fin d'été pendant les étiages sévères, pendant lesquels le bouchon vaseux remonte très à l'amont et s'éloigne de l'embouchure.

Il devient alors plus aisé de caractériser et quantifier le rôle du débit et des vagues, en s'intéressant par exemple aux anomalies médianes par marée par conditions de débit et vagues (Figure 15). Nous retrouvons l'impact dominant des vagues comparativement au débit, avec des anomalies inférieures à 10mg/l en absence de vagues à plus de 50mg/l pour des valeurs de H_{sP90} supérieures à 2.5m. Au contraire, l'effet du débit, plus faible (i.e. de l'ordre que 10mg/l) est principalement visible hors période de tempête.

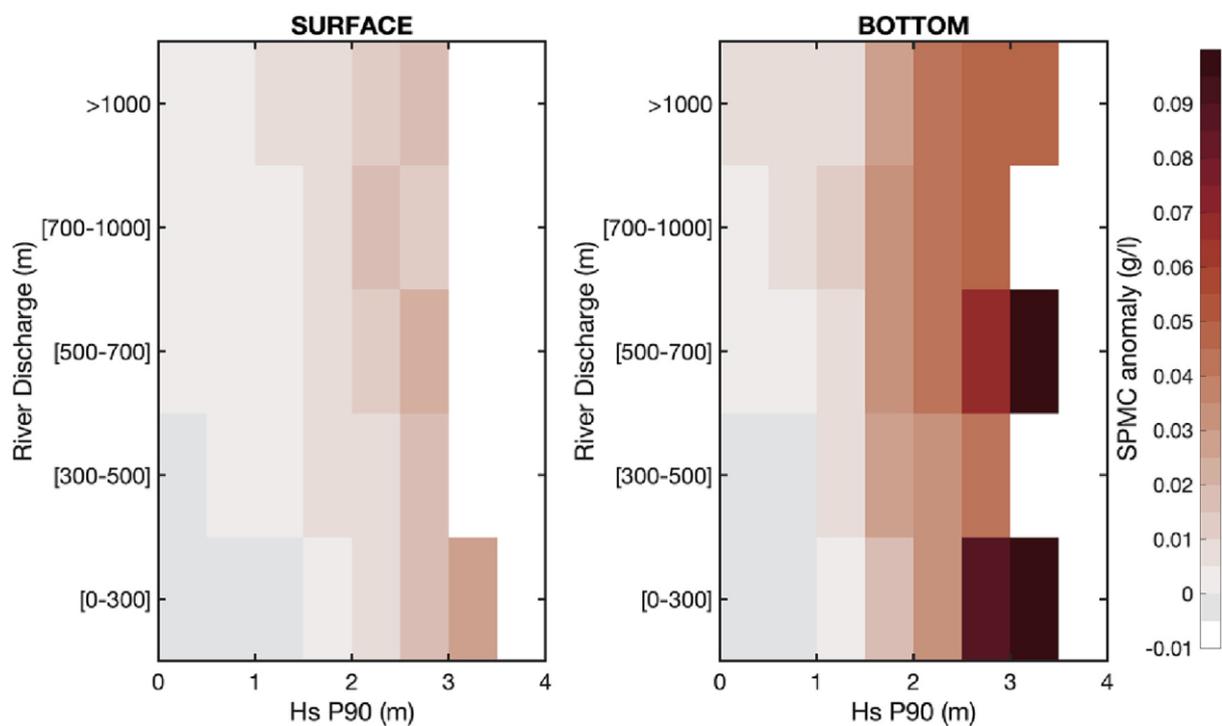


Figure 15 : Influence du débit et des vagues (H_{sP90}) sur les anomalies de concentration en MES (analyse par classes de débit et vagues)

VIII. Estimation des flux sédimentaires à l'interface entre estuaire et mer côtière

Les observations réalisées à SCENES, et notamment les mesures acoustiques obtenues par l'AWAC et calibrées en concentration en MES permettent d'accéder à des mesures de flux sédimentaires. Les Figure 16 et Figure 17 présentent un exemple de flux sédimentaires calculés sur un demi cycle VE/ME respectivement en période de temps calme ou lors d'une tempête.

En période de temps calme, les flux (surface et fond) augmentent avec le marnage, les flux étant toutefois plus importants et positifs au fond lors du flot. On retrouve cette dynamique sur les flux intégrés sur la colonne d'eau, avec des flux faiblement négatifs de pleine mer à basse mer et des flux positifs forts au flot. S'intéressant aux flux résiduels par marée, les flux de surface sont essentiellement négatifs, dirigés vers la baie, et les flux de fond positifs, dirigés vers l'estuaire. Ces derniers sont, une nouvelle fois, plus importants au fond. L'examen des flux résiduels intégrés sur la colonne d'eau indique finalement un import local de sédiment vers l'estuaire, et ce même pour des marnages moyens.

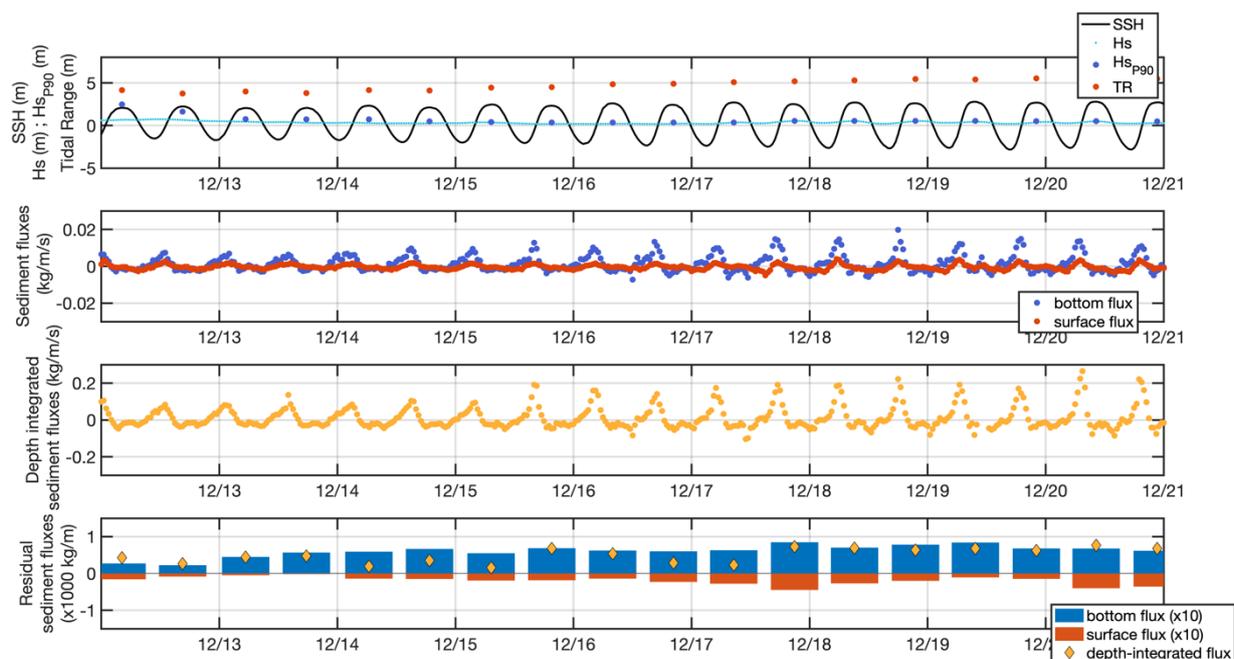


Figure 16 : Exemple de la variabilité des flux sédimentaires en surface, au fond, intégré sur la verticale par temps calme ($H_{s_{p90}} < 1m$): flux instantanés et résiduels par marée. Illustration de la période allant du 12/12/2021 au 20/12/2021)

En période de tempête (Figure 17), la forte érosion et remise en suspension des sédiments de fond dans l'ensemble de la colonne d'eau implique une forte modification des flux. Ainsi, les flux au jusant s'intensifient, avec pour conséquence des flux résiduels intégrés sur la colonne d'eau fortement négatifs, traduisant un export de sédiment vers la baie. Cet effet de la tempête reste visible plusieurs marées après le pic de vague.

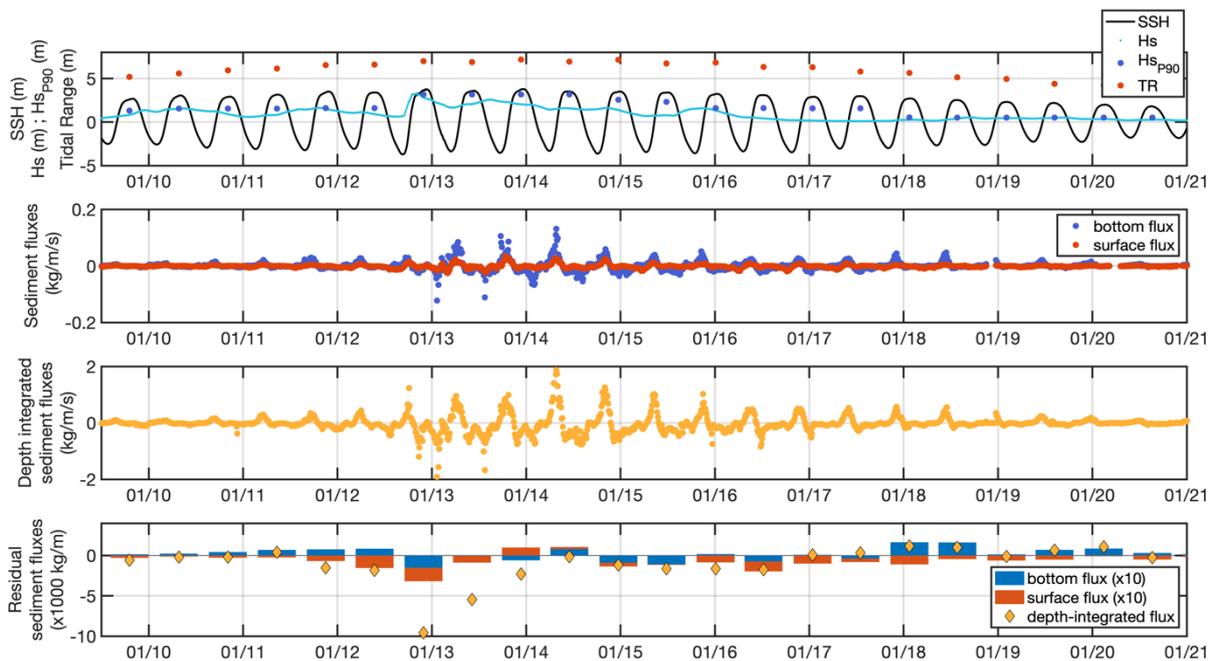


Figure 17 : Exemple de la variabilité des flux sédimentaires en surface, au fond, intégré sur la verticale en période de tempête ($H_{s_{P90}} > 2m$) : flux instantanés et résiduels par marée. Illustration de la période allant du 09/01/2017 au 21/01/2017)

Afin de mieux analyser l'effet des différents forçages (marée, débit et vagues) sur la direction et l'intensité des flux, les flux résiduels par marée ont été classés par conditions de débit, marnage et vagues (Figure 18) et réduits en calculant la médiane ou la moyenne de ces flux. Les flux résiduels de surface sont tous négatifs et orientés sortant de l'estuaire vers la baie. Le marnage est le principal forçage dominant, passant de $O(1-10)kg/m$ en ME à plus de $50kg/m$ en VE. Les vagues renforcent l'export vers la baie en surface, notamment pour des débits supérieurs à $300m^3/s$. L'effet du débit sur les flux résiduels de surface est plus faible, et principalement visible pour des marnages moyens et peu d'agitation par les vagues.

Au contraire, les flux près du fond sont orientés vers l'estuaire. L'effet du marnage (et de l'asymétrie des concentrations entre flot et jusant) est fort, avec des flux plus importants en VE, mais ici l'effet du débit est significatif, avec une augmentation des flux avec le débit. Cet effet est dû au renforcement de la circulation barocline par fort débit (Figure 11), favorisant la remontée des sédiments de fond vers l'estuaire.

Ces résultats se retrouvent à travers l'analyse des flux résiduels intégrés sur la colonne d'eau. Par faible débit, ces flux sont dirigés vers l'amont par faible marnage, et vers la baie par fort marnage. Les vagues accentuent l'export, également pour des marnages moyens. L'augmentation du débit implique un renforcement de l'import de sédiment, inversant ainsi la tendance pour des marnages entre 6 et 7m, ou diminuant fortement l'export lors des très fortes VE.

Les cartes de flux résiduels par conditions de forçages peuvent être construites en utilisant deux opérateurs différents : la médiane ou la moyenne. Pour une même condition de forçage, les flux observés peuvent être d'intensité variable et même de direction opposées. Cette incertitude est traduite par les triangles blancs de la Figure 18, que l'on retrouve principalement à la frontière entre conditions principalement sortantes ou entrantes. Le choix de l'opérateur (médiane ou moyenne) ne

change pas les tendances générales observées, mais peut moduler les intensités calculées, voir les directions. Ce constat amène deux points de discussion et de vigilance :

- i) Le nombre de marées utilisées pour calculer les moyennes ou médianes reste faible pour des valeurs « extrêmes » de forçages (faible ME ou très forte VE, conjugué à des débits fort à très forts ou des tempêtes très fortes, statistiquement peu observés par année). Ces calculs pourront être revisités au fil des années d'observations accumulées, permettant ainsi d'affiner et de consolider ces conclusions quantitatives.
- ii) La calibration du signal acoustique rétrodiffusé et les concentrations en MES associées peut être incertaine lors des forts épisodes de tempêtes, pour lesquels nous ne bénéficions pas de mesures de référence par bateau.

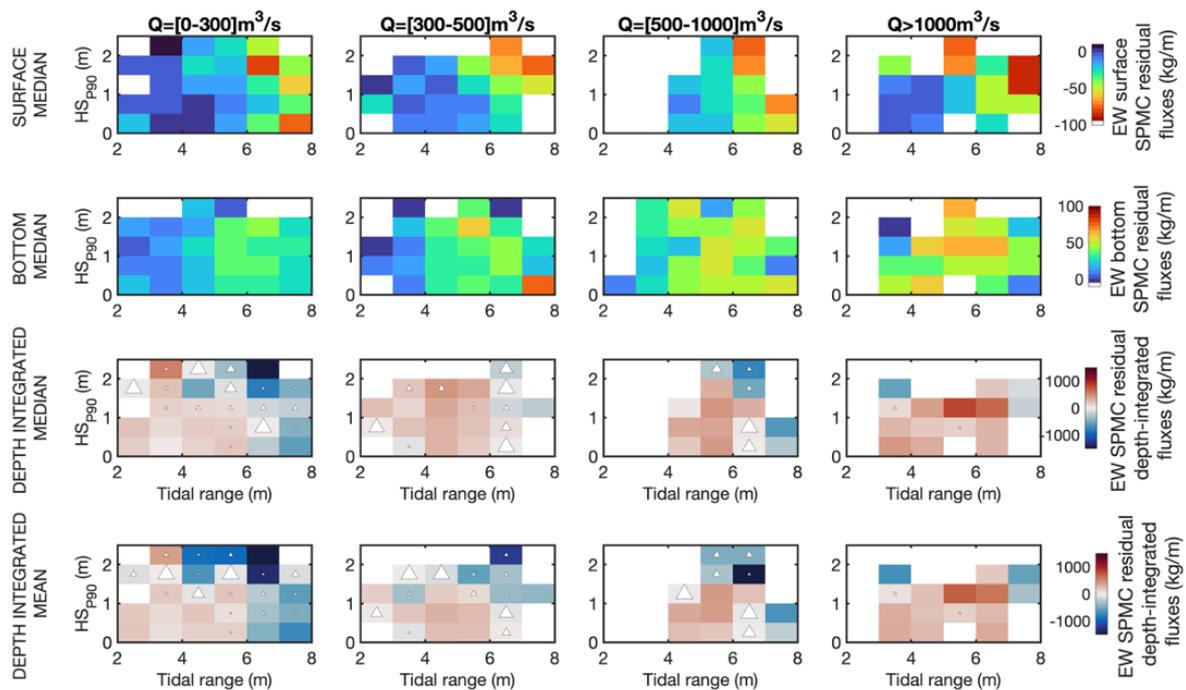


Figure 18 : Analyse de l'influence de la marée, du débit et des vagues sur les flux résiduels de surface, de fond et intégrés sur la colonne d'eau. Les triangles indiquent des observations de flux résiduels à la fois positifs et négatifs pour une même condition de forçage. La taille du triangle indique le degré d'incertitude (croissant avec la taille) du flux médian ou moyen calculé.

Les données de la station SCENES ne sont malheureusement pas continues dans le temps, il ne nous est donc pas possible de calculer directement les flux sédimentaires cumulés sur l'ensemble de la période de mesure. Toutefois, le classement des valeurs de flux résiduels intégrés sur la colonne d'eau par condition de forçage peut être utilisé pour estimer un flux cumulé.

Un premier calcul a été réalisé en prenant le flux résiduel intégré médian pour chaque condition de forçage marée après marée (Figure 19 – courbe orange). Ce calcul indique une tendance nette à l'import de sédiment vers l'estuaire. Au contraire, un calcul similaire à partir des valeurs moyennes indique une tendance à l'export (Figure 19 – courbe bleue). Ces différences sont dues aux incertitudes sur les flux résiduels pour certaines conditions de forçage, expliqué ci-avant. Il n'est cependant actuellement pas possible d'argumenter en faveur de l'une ou l'autre de ces méthodes.

Une troisième option a été choisie. Au lieu de prendre la valeur moyenne ou médiane pour une condition de forçage données, on tire au hasard une des valeurs observées, créant ainsi une courbe de flux cumulée. Cette méthode est renouvelée 300 fois, créant un ensemble de courbes de flux cumulés (Figure 19 – courbe grises). La moyenne de ces ensembles est ensuite calculée (Figure 19 – courbe noire).

Les résultats des ensembles montrent une tendance à l'équilibre ou à l'export sur la période 2015-2022, avec des flux allant de 50Tonnes/m à -200Tonnes/m. La moyenne des ensembles indique un export de l'ordre de 80Tonnes/m. Ces valeurs sont très éloignées de la courbe médiane, et en deçà des chiffres produits par la courbe moyenne. Il faut malgré tout rappeler que cette estimation des flux reste très dépendante de la qualité des mesures de concentration en MES et de la quantité de cycles de marée par conditions de forçages, comme rappelé ci-avant.

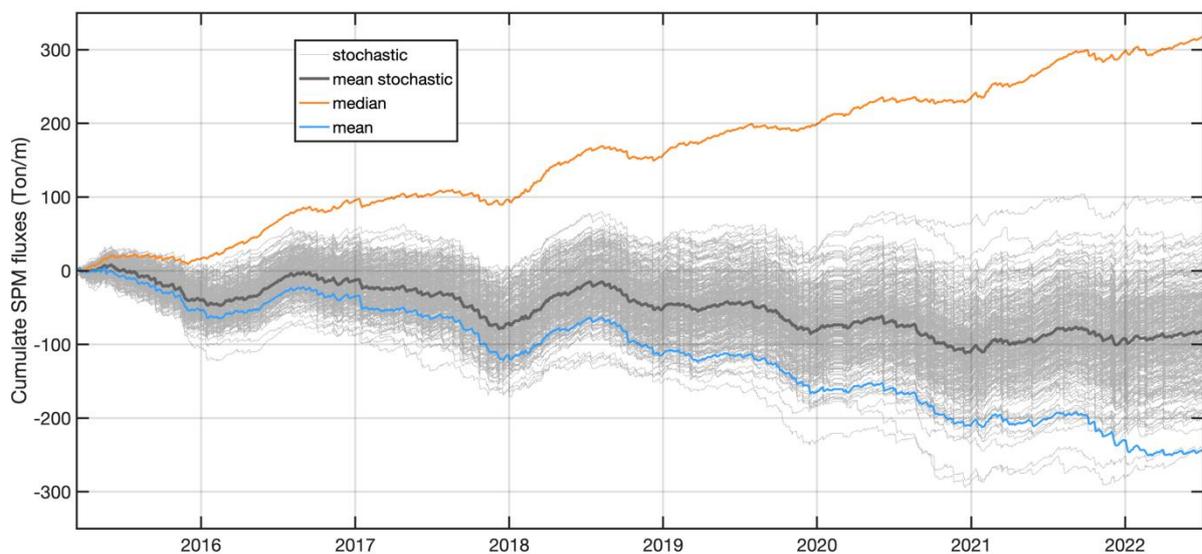


Figure 19 : Flux résiduels cumulés estimés à partir des moyennes de flux résiduel par classes de conditions hydro-météorologiques. Les lignes grisées illustrent les flux issus de la méthode stochastique tirant aléatoirement une valeur de flux observée au sein des classes de conditions hydro-météorologiques considérées marée par marée. La ligne noire indique la moyenne des courbes stochastiques. La ligne orange représente le flux cumulé si le flux médian par classe est considéré, et la ligne bleue si le flux moyen par classe est considéré.

On peut observer à partir de la Figure 19 une forte variabilité interannuelle des flux. Cette variabilité est explorée entre 2015 et 2021 et mise en regard des caractéristiques annuelles de débit et de vagues (Figure 20). Les années humides, caractérisées par un débit moyen supérieur à $500\text{m}^3/\text{s}$ (2015-2016 ; 2017-2018 et 2020-2021) se caractérisent par une tendance annuelle à l'import de sédiment vers l'estuaire, de l'ordre de 20tonnes/m. L'année 2019-2020 est également une année humide, mais elle se caractérise surtout comme ayant une signature très tempétueuse, ce qui aboutit à un export net de sédiment sur l'année ($\sim -30\text{Tonnes/m}$). Les années 2016-2017 et 2018-2019 sont deux années sèches, et se traduisent toutes deux par un export net de sédiment (entre -25 et -40Tonnes/m), et ce même si l'année 2016-2017 est l'année la moins impactée, statistiquement, par les tempêtes. La trop faible contribution de la circulation barocline ne contrebalance pas l'agitation moindre (mais malgré tout présente).

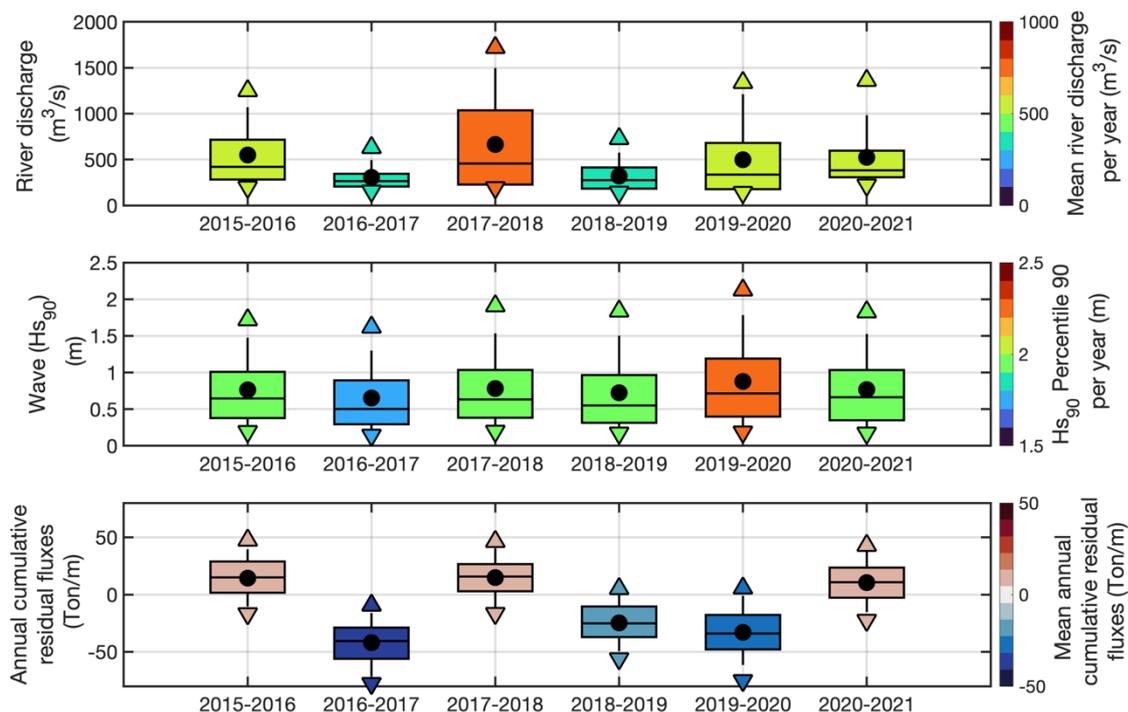


Figure 20 : Statistiques annuelles des distributions du débit, des vagues et des flux résiduels cumulés de 2015 à 2021. Les séparations annuelles se font sur critère hydrologique, i.e. autour des étiages de fin d'été : l'année 2015-2016 couvre ainsi pour exemple la période octobre 2015 à septembre 2016.

IX. Analyse des événements extrêmes

Cette dernière partie traite des événements extrêmes dans les forçages de débit et de vagues mais également dans le signal de concentration en MES, et de leurs relations. Ce travail peut être étudié en détail en se rapportant à la publication de Poppeschi et al. (2024).

1. Méthode de détection des événements extrêmes

La méthode de détection des événements extrêmes repose sur le concept classique de dépassement de seuil. Usuellement, le seuil peut être une valeur fixe, souvent un percentile de la variable d'intérêt sur la période considérée. Ce choix peut être pertinent lorsque l'on cherche des valeurs extrêmement fortes. Toutefois, lorsque le signal est fortement variable saisonnièrement, la méthode ne permet pas de détecter des extrêmes locaux. Ainsi, nous avons adapté la méthode par seuil, en calculant un seuil variable, comme illustré Figure 21. Le signal de vagues (ici le percentile 90 de la vitesse orbitale quadratique par marée, U_b^2) est découpé par année hydrologique entre 2006 et 2022, et on obtient, pour la première marée du 1^{er} septembre, 17 valeurs, dont on extrait le percentile 90. Ce calcul est répété pour toutes les marées successives. On obtient alors le signal orange de la Figure 21. Ce signal est ensuite lissé via le calcul d'un second percentile 90, sur une fenêtre glissante de 30 jours centrée sur la marée étudiée. Appliquée à l'ensemble des marées, on obtient finalement la courbe rouge, qui

correspond au seuil variable utilisé pour détecter les événements extrêmes de vague, points rouges identifiés sur la figure. De fait, la méthode n'identifie pas uniquement les crues extrêmes (plus fortes valeurs absolues), mais des extrêmes de débit locaux, signant les crues mais également des débits anormalement forts en période d'étiage par exemple.

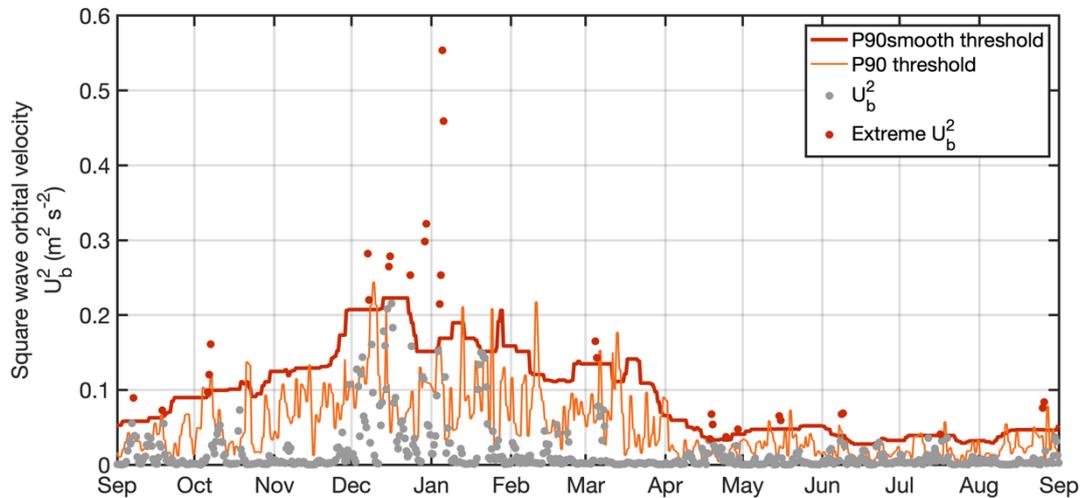


Figure 21 : Méthode d'analyse des signaux et de détection des événements extrêmes : exemple avec les vagues (vitesse orbitale quadratique U_b^2)

Chaque événement est ensuite caractérisé par différents paramètres (Figure 22) :

- i) la durée de l'événement, correspondant au nombre de marées successives au-dessus du seuil,
- ii) l'intensité de l'événement, i.e. la valeur maximale observée sur la durée de l'événement,
- iii) l'intensité relative, i.e. la différence entre l'intensité et la valeur du seuil,
- iv) la succession d'événement, i.e. le nombre d'événements extrêmes se suivant en moins d'une semaine

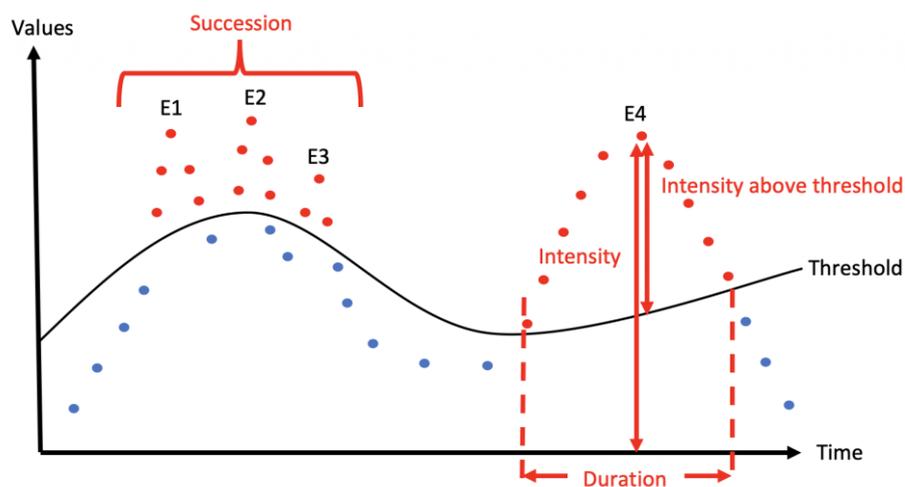


Figure 22 : Caractérisation des événements extrêmes : intensité brute, intensité relative par rapport au seuil, durée et succession

2. Identification des événements extrêmes dans les forçages débit et vagues

Cette méthode est appliquée au signal de débit (interpolé sur les horaires de pleine mer) et sur le signal de vagues U_b^2 (percentile 90 par marée de la vitesse orbitale quadratique) sur la période 2006-2022 (Figure 23). 20 événements extrêmes de débit sont identifiés, entre 0 (2009-2010 et 2018-2019) et 2 par an. 211 événements extrêmes de vagues sont quant à eux détectés sur la même période, entre 5 et 22 par an. Le grand nombre d'événements extrêmes de vagues s'explique par la très forte et rapide variabilité temporelle de l'intensité du signal de vagues, et par l'utilisation du seuil variable, détectant des événements d'intensité moyennes lors de périodes de faible intensité inter annuellement.

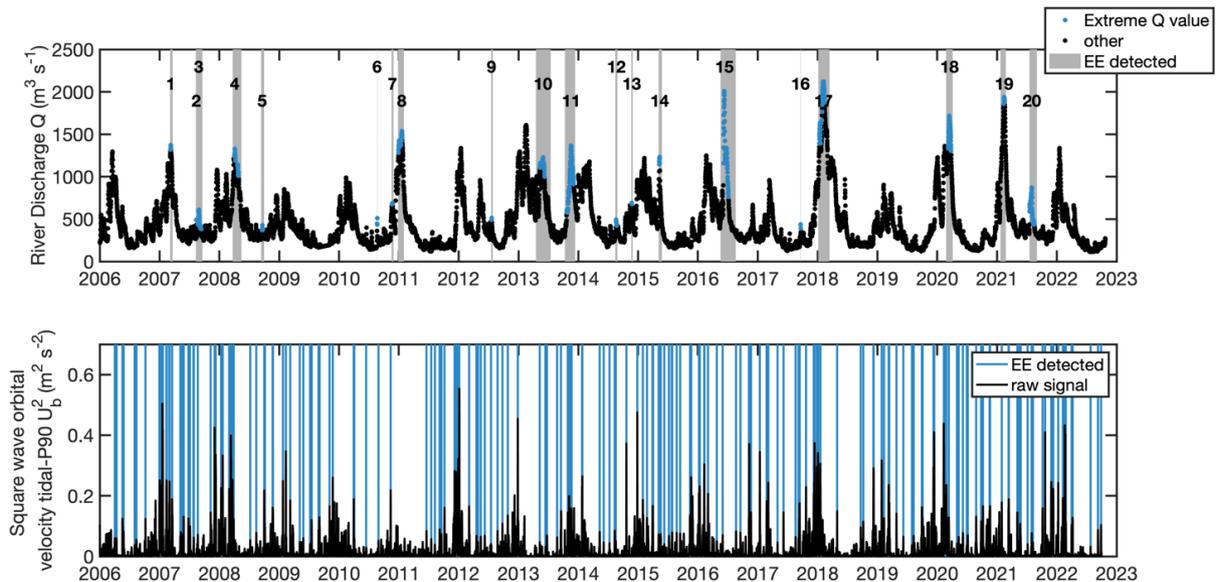


Figure 23 : Événements extrêmes de débit et de vagues détectés entre 2006 et 2023. Points bleus pour les débits, traits bleus pour les épisodes de vagues.

Les épisodes de débit extrêmes ont comme attendu une très forte signature saisonnière (Figure 24). Les événements les plus intenses ($Q > 1000 \text{ m}^3/\text{s}$) sont enregistrés en hiver et début de printemps, tandis que les événements en fin d'étiage se caractérisent par un débit de l'ordre de $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Également en moyenne, plus l'événement est intense, plus sa durée est importante, passant de moins de 50 marées à plus de 150 marées.

Les événements extrêmes de vagues sont eux significativement plus courts, couvrant des durées de 1 à 7 marées. Là encore la variabilité saisonnière est forte, avec les événements les plus intenses en hiver (supérieurs à $0.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$) et les événements estivaux inférieurs à $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

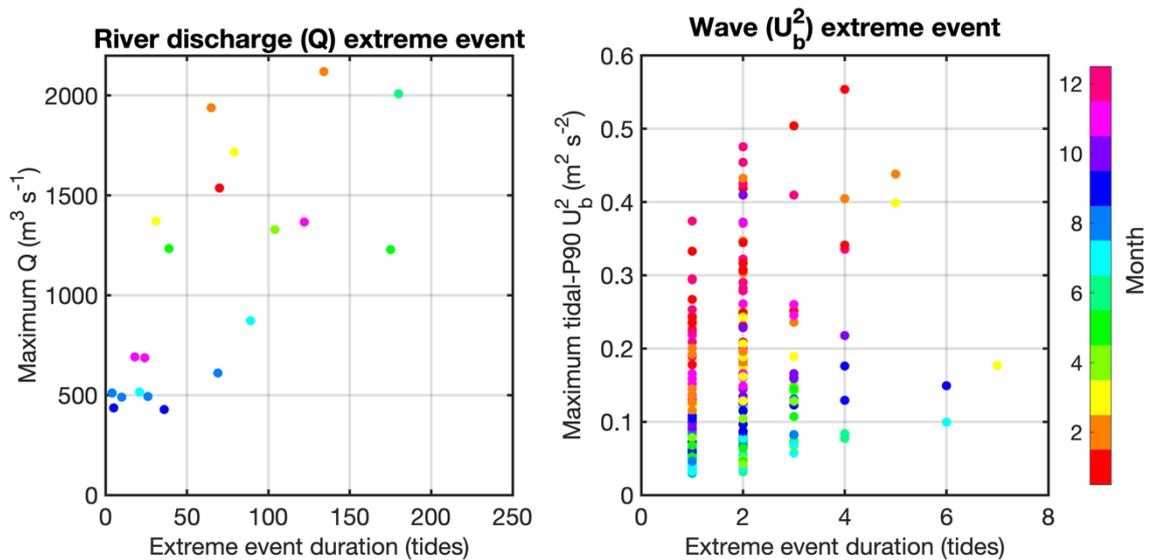


Figure 24 : Caractéristiques des événements extrêmes de débit (gauche) et de vague (droite) : durée, intensité par saison

3. Analyse croisée entre anomalies de concentration en MES et événements extrêmes de vagues - importance de la saisonnalité

Nous nous intéressons maintenant à la réponse hydrosédimentaire de l'embouchure aux événements extrêmes détectés. L'influence des événements de débit n'est pas facilement détectable, car souvent superposée à l'effet, plus important, des vagues (voir partie précédente). L'effet des événements de vagues est plus clair : plus l'événement sera intense, plus l'anomalie de concentration en MES sera forte, que ce soit au fond ou en surface (Figure 25). Les archives de modélisation numérique du projet Seine Aval ARES ont également été mobilisées pour cette action. La même approche a été utilisée pour calculer les anomalies, et les conclusions sont similaires à celles déduites des observations de la station SCENES.

Les résultats précédents laissent à penser que l'impact des événements extrêmes (débit ou vagues) seraient les plus impactants en hiver, car générant des réponses en anomalies les plus fortes en absolu. Cette conclusion est cependant à mettre en perspective de la saisonnalité moyenne interannuelle des anomalies de concentration en MES (Figure 26).

Nous nous intéressons dans un premier temps aux événements extrêmes de vagues, et la réponse en anomalie de concentration en MES au fond. De décembre à février, les événements extrêmes induisent des réponses en anomalie de concentration en MES variant de 25 à 150mg/l, alors que le percentile 90 mensuel calculé sur les données interannuelles de 2006 à 2022 est de l'ordre de 80mg/l. Les anomalies extrêmes sont donc souvent inférieures à 2 fois le percentile 90 saisonnier. En avril et mai, les anomalies extrêmes varient entre 20 et 80mg/l, mais le percentile 90 saisonnier est de l'ordre de 15mg/l. Les événements extrêmes à cette période sont donc en relatif plus impactant (x4) qu'en hiver (x2). Ces résultats sont qualitativement équivalents pour les données de surface.

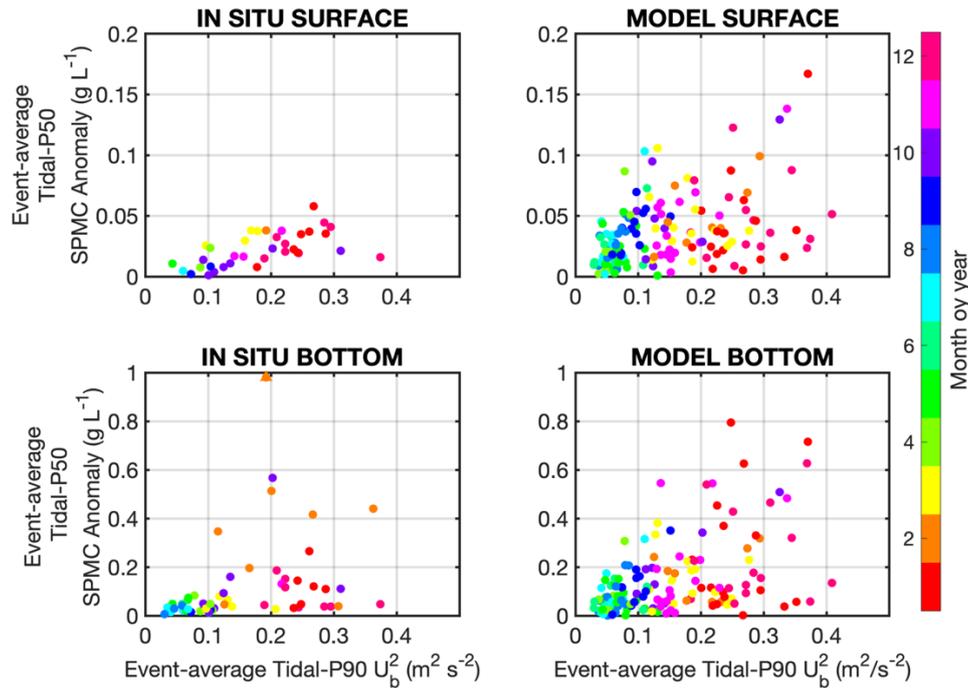


Figure 25 : Variation temporelle des événements extrêmes dans les forçages et réponse en concentration en MES au fond et en surface

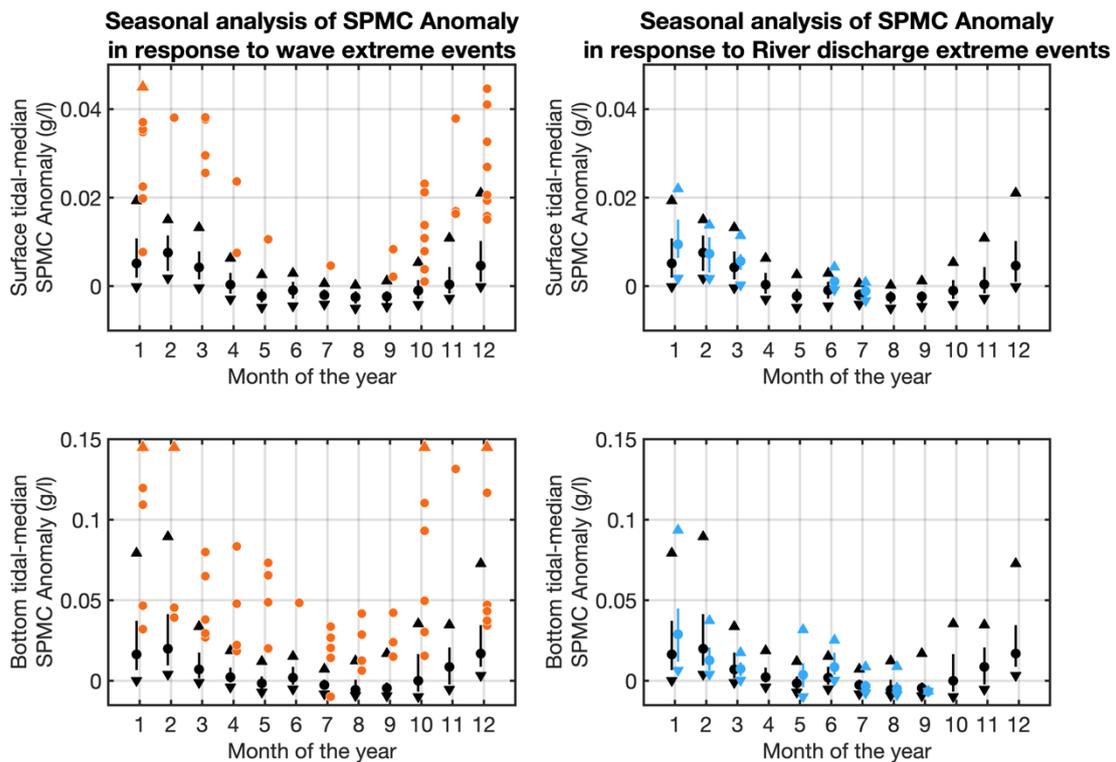


Figure 26 : Analyse saisonnière de la réponse de la concentration en MES (haut, surface ; bas, fond) en réponse aux événements extrêmes de vague (gauche) et de débit (droite). En noir sont présentées les statistiques des anomalies mensuelles interannuelles, en couleur les valeurs d'anomalies observées pendant les événements extrêmes. Les triangles oranges indiquent des valeurs observées plus fortes que 0.15g/l au fond ou 0.05g/l en surface pendant les événements extrêmes de vague.

Concernant les événements de débit, la saisonnalité est moins marquée. Toutefois, un événement extrême majeur, comme la crue en Juin 2016, impacte clairement les anomalies de concentration en MES.

4. Quelle évolution à long terme des occurrences des événements extrêmes ?

Les événements hydro-météorologiques extrêmes sont en croissante augmentation à l'échelle du globe, à la fois en intensité et en fréquence, avec des conséquences potentiellement fortes sur les écosystèmes, comme nous l'avons illustré pour les MES (Breitburg *et al.*, 2018; Ibrahim *et al.*, 2021; IPCC, 2021). Nous cherchons à caractériser cette évolution en estuaire de Seine, à travers le signal de débit. En effet, nous avons à notre disposition une longue chronique de débits journaliers de 1962 à 2022. Un seuil variable a été recalculé sur l'ensemble de la période, et les événements extrêmes de débits identifiés (intensité et durée) et comptabilisés annuellement et par trois périodes de 20ans consécutives (Figure 27). De façon très nette, le nombre d'événements extrêmes a augmenté entre la période 1962-1981 et 2002-2021, avec respectivement 22 et 40 événements. Si le nombre des événements de courte durée a doublé, toutes les classes d'intensité sont en augmentation. Il est intéressant de noter que cette augmentation n'est pas linéaire : la période 1982-2001 a enregistré le plus d'événements, comparativement à la période suivante (51 contre 40). Cette variabilité pluri-décennale peut s'expliquer en partie par la variabilité climatique grande échelle, comme discuté par Garner *et al* (2015) ou Jalon Rojas and Castelle (2021).

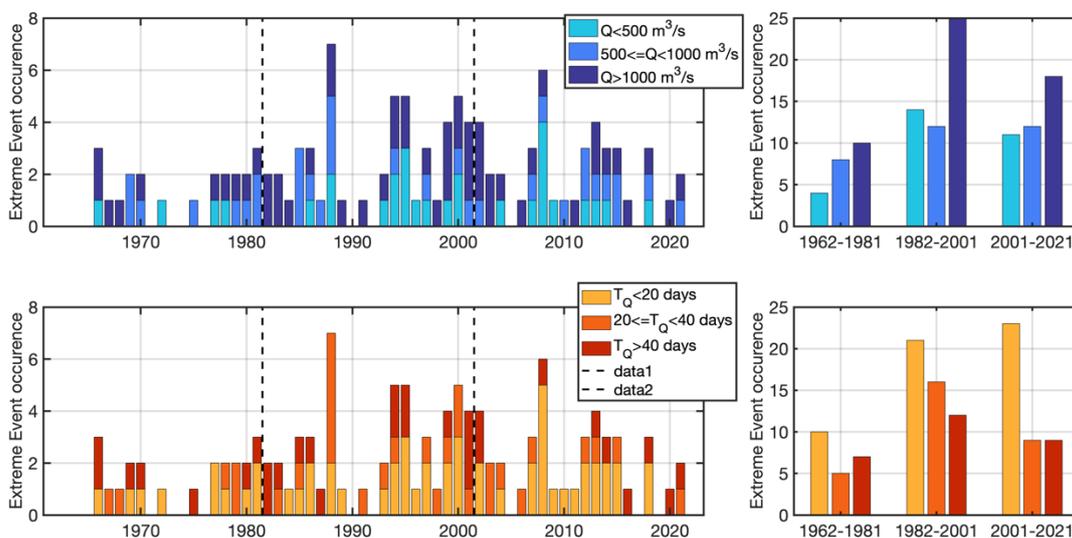


Figure 27 : Évaluation de la distribution annuelle des événements extrêmes de débit entre 1962 et 2022 (de septembre N-1 à aout N) (gauche). Ces statistiques sont regroupées par périodes de 20 ans (droite) : 1962-1981 ; 1982-2001 ; 2002-2021. Les coupures de 20ans sont indiquées en pointillés dans la série temporelle à gauche.

Au-delà de la variabilité des fréquences interannuelles, il est possible d'analyser l'évolution éventuelle de la saisonnalité de ces événements de débit (Figure 28), sur les trois périodes de 20ans successives.

Les distributions des événements extrêmes en hiver (de janvier à février) et en été (de juin à septembre) sont relativement équivalentes en termes d'occurrence et d'intensité. Plus d'occurrences sont observées entre octobre et décembre et entre avril et juin dans les décennies récentes. Il est également important de noter un décalage saisonnier des événements printaniers. Un seul événement supérieur à 1000m³/s est détecté, début avril sur la période 1962-1981, et aucun jusqu'en juin. Sur la période 1982-2001, les événements majeurs (7) sont principalement en avril, et un seul en mai. Sur la période 2002-2021, les événements majeurs (3) sont tous observés en mai (ou début juin) et aucun avant. Cette occurrence de plus en plus tardive des événements extrêmes de forte intensité intervient pendant une période de débit décroissant. L'impact de ces événements sur l'écosystème côtier et estuarien est donc à considérer avec attention.

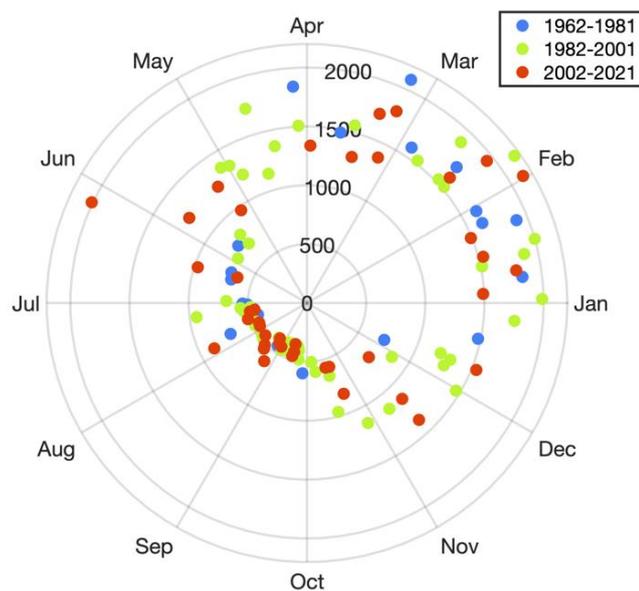


Figure 28 : Variation pluri-décennale de la saisonnalité des événements extrêmes de débit entre 1962 et 2021

CONCLUSION

L'analyse des données SCENES de 2015 à 2022 a permis de caractériser la variabilité de la concentration en MES en surface et au fond, et de la relier aux principaux forçages hydro-météorologiques : marée, débit et vagues.

La marée est un forçage fort et régulier de la dynamique sédimentaire dans le système d'embouchure. Les vagues, en remettant en suspension localement les sédiments d'embouchure, ont un impact quantitativement plus important, mais saisonnier et plus ponctuel, à l'échelle des tempêtes. Le débit est un contributeur plus faible relativement à la marée et aux vagues, mais reste significatif. Son impact est principalement associé au déplacement du bouchon vaseux vers l'aval par débit moyen à fort.

Les données SCENES ont également permis de quantifier des flux sédimentaires, localement à la station. Une méthode d'évaluation des flux résiduels cumulés sur l'ensemble de la période d'étude a été proposée, permettant une évaluation préliminaire des bilans sédimentaires sur la période 2015-2022. L'importance du pompage tidal, de la circulation barocline et des tempêtes a pu être mise en évidence. Le débit a une influence forte sur la stratification et la circulation barocline, contribuant à un import de sédiment vers l'estuaire, tandis que les vagues contribuent, via une importante remise en suspension des sédiments, à un export vers la baie. Des bilans annuels ont également été réalisés, et comparés aux caractéristiques annuelles de débit et de vagues. Ces résultats se caractérisent par une incertitude liée à la durée limitée des observations et aux méthodes de calcul de la concentration en MES par méthode acoustique. Ces résultats devront être revisités lorsque ces méthodes seront consolidées.

Finalement, un zoom a été fait sur les événements extrêmes (de débit et de vague) sur la période 2006-2022. Les résultats ont mis en évidence un lien évident entre l'intensité de l'événement et l'intensité de la réponse en MES. Toutefois, il a été montré que les événements extrêmes de moins grande amplitude se produisant au printemps avait un impact relatif par rapport à la climatologie mensuelle interannuelle plus fort que les événements hivernaux les plus intenses.

BIBLIOGRAPHIE

Artelia, 2019. Définition des périodes de retour des forçages et des niveaux de pleines mers en estuaire de Seine pour la gestion du risque inondation. Rapport réalisé pour le GIP Seine-Aval et la DREAL Normandie, 99.

Breitburg, D., Levin, L.A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F.P., Conley, D.J., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D., Isensee, K., Jacinto, G.S., Limburg, K.E., Montes, I., Naqvi, S.W.A., Pitcher, G.C., Rabalais, N.N., Roman, M.R., Rose, K.A., Seibel, B.A., Telszewski, M., Yasuhara, M., Zhang, J., 2018. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371). <https://dx.doi.org/10.1126/science.aam7240>.

Chapalain, M., Verney, R., Fettweis, M., Jacquet, M., Le Berre, D., Le Hir, P., 2019. Investigating suspended particulate matter in coastal waters using the fractal theory. *Ocean Dynamics* 69, 59–81. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1229-6>

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>

Garner, G., Van Loon, A.F., Prudhomme, C., Hannah, D.M., 2015. Hydroclimatology of extreme river flows. *Freshwater Biology* 60, 2461–2476. <https://doi.org/10.1111/fwb.12667>

Ibrahim, O., Mohamed, B., Nagy, H., 2021. Spatial variability and trends of marine heat waves in the eastern mediterranean sea over 39 years. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(6), 643. <https://doi.org/10.3390/jmse9060643>.

IPCC, Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Peian, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., 2021. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, 2, 2391 pp.

Jalón-Rojas, I., Castelle, B., 2021. Climate control of multidecadal variability in river discharge and precipitation in western Europe. *Water*, 13(3), 257. <https://doi.org/10.3390/w13030257>.

Poppeschi, C., Verney, R., Charria, G., submitted. Suspended particulate matter response to extreme forcings in the Bay of Seine. *Marine Geology* 472, 107292. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2024.107292>

Tessier, C., Le Hir, P., Lurton, X., Castaing, P., 2008. Estimation de la matière en suspension à partir de l'intensité rétrodiffusée des courantomètres acoustiques à effet Doppler (ADCP). *Comptes Rendus Geoscience* 340, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.10.009>

Thorne, P.D., MacDonald, I.T., Vincent, C.E., 2014. Modelling acoustic scattering by suspended flocculating sediments. *Continental Shelf Research* 88, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.07.003>

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.), Le Berre D., Poppeschi C., Grasso F., Charria G., 2024. *Dynamique des sédiments en suspension à l'embouchure : analyse des données SCENES. Rapport Ifremer pour le projet PHRESQUES - Volet Valorisation, 33p.*

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

