



Rapport de synthèse



PHRESQUES : synthèse de la phase 2

Projet d'harmonisation et de renforcement
du suivi haute-fréquence de la qualité de
l'eau de la vallée de Seine

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.



GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

Décembre 2024

RESUME EXECUTIF

Le projet d'harmonisation et de renforcement du suivi haute-fréquence de la qualité de l'eau de la vallée de Seine (PHRESQUES) a pour objectifs principaux le renforcement du système de mesure haute fréquence de la qualité de la Seine, allant de Paris à la mer, ainsi que la mise en œuvre d'actions d'innovation pour suivre des paramètres clefs et améliorer la compréhension du fonctionnement de ce continuum, ainsi que son évolution. La phase 2 du projet PHRESQUES s'est achevée en octobre 2024. Grâce à l'implication des différents acteurs scientifiques et techniques, la dynamique PHRESQUES se poursuit et l'acquisition de données reste effective.

1. Renforcement

Dans le cadre du renforcement du suivi de l'estuaire, deux actions ont été menées. La première vise à **mettre en place une station à l'interface estuaire/baie**, qui a pour vocation de servir de station laboratoire. L'objectif est d'avoir une station facilement accessible et dimensionnée de façon à servir de laboratoire *in situ*. Cette action a pu aboutir à une version avancée d'un cahier des charges pour la réalisation de la station (2019-2021), mais cette dernière n'a pas été engagée pour des raisons de responsabilité technique et juridique.

La seconde action concerne la **mise en place d'une station de mesure à l'interface fleuve/estuaire**. Cette action, initialement prévue en phase 1 et reportée en phase 2 pour des raisons techniques, a été réalisée en fin d'année 2023 par un prestataire (DTEK). Une bouée instrumentée, reliée à un ponton, est déployée sur le site de Poses et, à l'heure actuelle, présente des mesures de température, oxygène dissous, turbidité, nitrate et conductivité valides. Seules les mesures de fluorescence de la chlorophylle *a* ne sont pas encore correctement étalonnées et le courantomètre n'est pas encore fonctionnel. Les comparaisons réalisées entre les mesures à Poses et aux stations situées en amont et en aval démontrent l'intérêt stratégique de la station pour comprendre les phénomènes physico-chimiques le long du continuum, comme : la propagation des désoxygénations et des flux solides parvenant à la frontière amont de l'estuaire.

Enfin, dans le cadre du projet SYNAPSES en collaboration entre le GIP Seine-Aval et HAROPA Port, **une nouvelle station a été installée au niveau de la limite la plus amont du front de salinité** (*i.e.* Vatteville-la-Rue).

2. Innovation

Les actions d'innovation se sont concentrées sur trois paramètres : les nitrates, la production primaire et les Matières En Suspensions (MES). Les travaux menés par l'UMR-BOREA ont **déterminé la fiabilité de 5 capteurs de nitrate selon des conditions de turbidité et de salinité très variées**. Parmi ces capteurs, plusieurs sont efficaces dans des conditions bien particulières, mais un seul semble capable de produire des mesures fiables dans des conditions de turbidité et salinité changeantes : l'OPUS BRACK. Cette même équipe s'est également attachée à **caractériser la mesure de productivité primaire par fluorescence variable** avec le capteur LabSTAF. Cette méthodologie doit permettre d'obtenir des informations sur la production phytoplanctonique réelle *in situ*, contrairement à la fluorescence de la chlorophylle *a* qui n'est qu'un proxy pour estimer la production primaire. Les mesures effectuées par

ce capteur sont très rapidement affectées par la turbidité et génèrent des erreurs (3 à 5 %). Des corrections doivent être effectuées pour des mesures en estuaire et nécessitent des contrôles réguliers de la chambre de mesure. Pour cette raison, le déploiement de ce capteur pour des mesures en continu aux stations turbides de l'estuaire n'est pas recommandé, tant qu'un système de nettoyage automatique ne sera pas développé.

Le laboratoire DHYSED de l'IFREMER s'est concentré dans cette partie innovation au **développement d'une méthodologie pour caractériser, voire quantifier, les teneurs en vase et en sable des MES**. Elle se base sur la complémentarité des technologies optiques et acoustiques, qui doivent respectivement permettre de détecter les sédiments fins et les sables. Les tests en laboratoire ont démontré que les mesures étaient très sensibles aux fréquences acoustiques utilisées et très peu aux longueurs d'onde des instruments optiques (précision optimale avec une fréquence de 6 MHz sur la gamme testée). Les travaux sont effectués en deux temps, d'abord un indice de concentration sédimentaire (SCI, pour Sediment Composition Index) est mis en place et permet de déterminer les fractions sableuses et vaseuses. Dans un deuxième temps, les recherches se sont concentrées sur la quantification des concentrations des deux classes de sédiments en suspension. Cet indice de concentration sédimentaire (SCI) a été testé sur le terrain à l'embouchure tidale d'Ameland et de Seine (banc des ratelets et SCENES) et a démontré son efficacité pour comprendre la dynamique des sables en suspension, moins connue que pour les vases.

3. Valorisation

La **mise en place de l'observatoire "Axe Seine"** est la principale action de valorisation, sous forme d'indicateurs, des données acquises dans le cadre du méta-réseau PHRESQUES (<https://www.phresques.fr/>). Quatre volets y sont proposés, présentant les stations de suivi, la physico-chimie des eaux, la biogéochimie des eaux et la santé des organismes. L'observatoire propose une présentation du réseau et une diffusion simplifiée via des indicateurs explicatifs des variables environnementales, avec un volet cartographique et un volet textuel. Le volet "physico-chimie" propose des indicateurs sur l'évolution de la température et de l'oxygène dissous. Le volet "santé des organismes" se base sur les travaux effectués dans le cadre du projet BIOSURVEILLANCE et retrace les effets génotoxiques et immunotoxiques mesurés sur des organismes aquatiques engagés dans le milieu.

Une **analyse spécifique de la dynamique des matières en suspension** a été réalisée à partir des mesures de la bouée SCENES. Ce travail s'intéresse à la fois à l'impact des différents forçages, ainsi qu'aux flux et bilans sédimentaires résultant à la bouée SCENES. Les conclusions de ce travail révèlent une influence quantitative plus importante des vagues et de la marée par rapport au débit. Cependant, ce dernier a une influence non négligeable, car en présence de fort débit, la circulation barocline est renforcée, ce qui participe à l'import de sédiment vers l'estuaire. Les vagues, quant à elles, remettent ponctuellement des quantités significatives de sédiments en suspension, ce qui participe à l'export de sédiments vers la baie. Les années humides témoignent principalement de bilans sédimentaires positifs, c'est-à-dire avec plus de sédiments se dirigeant vers l'estuaire que vers la baie. A l'inverse, les années sèches ou particulièrement marquées par les tempêtes présentent des bilans sédimentaires négatifs.

Enfin, un **bilan des 10 premières années de mesure du réseau SYNAPSES** a permis de suivre l'évolution de plusieurs paramètres hydrométéorologiques et physico-chimiques dans l'estuaire de Seine. Cette analyse s'est intéressée aux évolutions : du débit (à Vernon), de la hauteur d'eau, de la hauteur des

vagues à l'embouchure, de la température atmosphérique (à Rouen-Boos) et de l'eau, de la concentration en oxygène dissous, de la conductivité, de la salinité et des MES. Ce travail révèle notamment une évolution des conditions à l'aval de l'estuaire, avec des positions moyennes du front de salinité et du bouchon vaseux qui remontent vers l'amont de l'estuaire. Le troisième résultat marquant est l'augmentation de la température moyenne de l'estuaire.

4. Animation

Le GIP Seine-Aval anime la démarche partenariale PHRESQUES pour faciliter les échanges méthodologiques, l'accès à la donnée produite, les analyses croisées des résultats et leur divulgation. Cette animation structure le méta-réseau PHRESQUES et participe à la construction et au renforcement des liens entre les communautés scientifiques et techniques intervenant dans le cadre de suivis haute-fréquence de Paris à la mer [Figure 1].

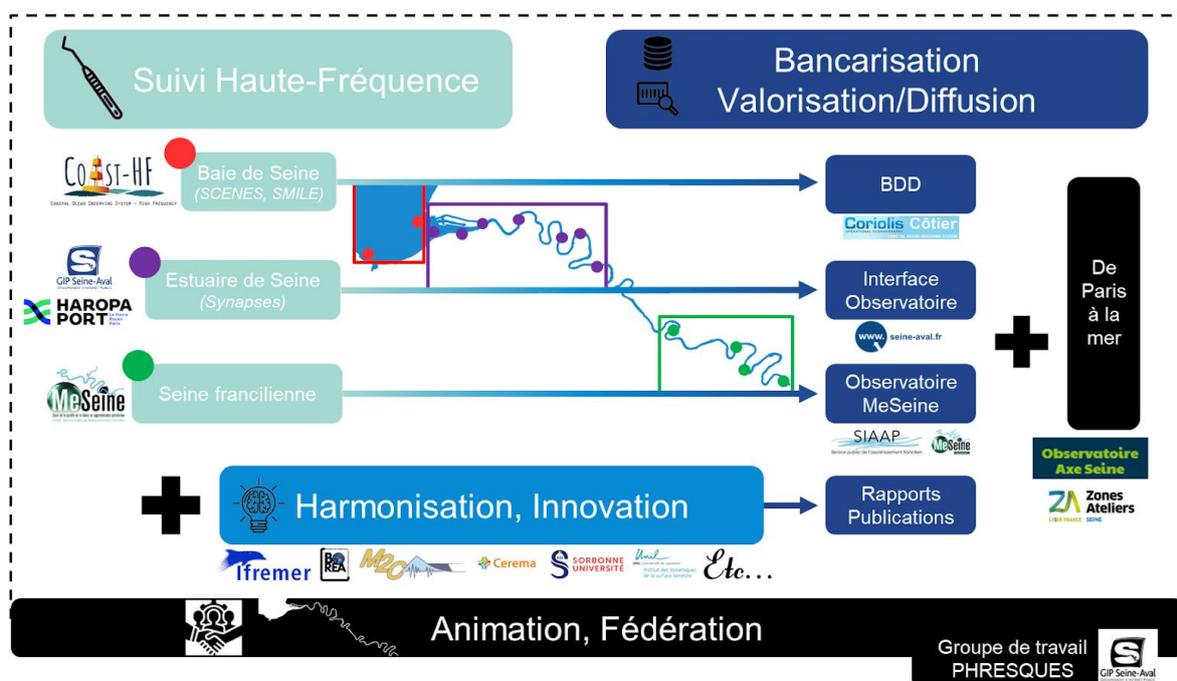


Figure 1 : La démarche partenariale PHRESQUES.

PARTENAIRES DU PROJET

Rédaction du rapport : Matthieu G. OLIVIER, Cédric FISSON, Romaric, VERNEY, Pascal CLAQUIN, Jean-Philippe LEMOINE, Jérémy MOUGIN.

GIP Seine-Aval

Equipe projet : Jean Philippe LEMOINE, Cédric FISSON, Matthieu G. OLIVIER

Implication :

- Coordination et animation du consortium
- Gestionnaire du réseau SYNAPSES
- Mise en place de la station à l'interface fleuve/estuaire (avec l'appui de la société DTEK et du laboratoire M2C de l'Université de Rouen Normandie)
- Mise en place de l'observatoire axe Seine pour la valorisation du réseau et des données
- Gestion des conventions

Ifremer (DYNECO/DHYSED)

Responsable scientifique : Romaric VERNEY

Implication :

- Gestionnaire de la station SCENES
- Couplage des méthodes optiques et acoustiques pour caractériser les MES
- Portage de l'étude de faisabilité de la station à l'interface estuaire/baie

Université de Caen Normandie (UMR BOREA, CREC Station marine)

Responsable scientifique : Pascal CLAQUIN

Implication :

- Gestionnaire de la station SMILES
- Tests de capteurs nitrates et production primaire

SIAAP

Equipe projet : Anthony MARCONI, Jérémy MOUGIN

Implication :

- Gestionnaire du réseau MeSeine
- Echange de données

CEREMA/M2C

Equipe projet : Jean Philippe LEMOINE

Implication :

- Représentativité des mesures de la station de Poses (RePoses)

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

Le projet PHRESQUES est labellisé Zone Atelier Seine



SOMMAIRE

INTRODUCTION : LE META-RESEAU PHRESQUES.....	8
AXE 1 - RENFORCEMENT DU META-RESEAU	11
1. Station à l'interface fleuve/estuaire (Poses).....	11
a. Mise en place de la station	11
b. Premières analyses des données acquises.....	12
c. Représentativité des mesures	14
2. Station à l'interface estuaire/baie (Fatouville)	15
AXE 2 - INNOVATION.....	18
1. Capteurs innovants liés aux cycles biogéochimiques.....	18
a. Capteurs optiques de nitrate	18
b. Capteurs de production primaire	20
2. Caractérisation des matières en suspension (MES).....	23
a. Test du couplage optique et acoustique en laboratoire	23
b. Applications	26
AXE 3 - VALORISATION	29
1. Observatoire Axe Seine	29
a. Présentation générale de l'observatoire Axe Seine	29
b. Les stations de suivi PHRESQUES.....	30
c. Les indicateurs Physico-chimie	30
d. Bancarisation des données.....	31
e. Affichage des données en direct	32
2. Interprétation des mesures à haute fréquence à l'embouchure (SCENES).....	33
a. Objectifs et données disponibles	33
b. Dynamiques des MES et influence des forçages	34
c. Estimation des flux sédimentaires.....	35
d. Analyse des événements extrêmes	36
3. Bilan de 10 ans de mesure du réseau SYNAPSES.....	38
a. Front de salinité.....	38
b. Bouchon vaseux et MES	39
c. Température de l'eau.....	39
d. Oxygénation de l'eau	39
4. L'observatoire Meseine.....	40
AXE 4 - ANIMATION DU RESEAU D'ACTEURS	42

PERSPECTIVES..... 43

BIBLIOGRAPHIE 44

INTRODUCTION : LE META-RESEAU PHRESQUES

La première phase du projet PHRESQUES s'est déroulée de juin 2016 à juin 2018 (Lemoine, 2018) et était composée de plusieurs axes de travail : l'harmonisation des mesures, le renforcement spatial du méta-réseau et l'innovation. Les tâches d'harmonisation ont permis de définir et de partager des principes communs de mesures hydro-sédimentaires et de production primaire applicables en milieux fluvial, estuarien et marin. Les objectifs de renforcement du réseau ont été plus difficiles à atteindre, notamment la mise en place de la station à l'interface estuaire/fleuve qui a été reportée en phase 2. La station SCENES a été mise en place à l'embouchure durant cette première phase. Pour compléter les suivis existants, plusieurs tests de capteurs innovants ont été effectués pour mesurer des paramètres : biogéochimiques, le carbone, les MES (Matière En Suspension) par acoustique et des sels nutritifs. Les tests pour les deux premiers paramètres ont été concluants et démontrent la possibilité de déployer ces sondes dans le cadre du méta-réseau en suivant des recommandations de mise en œuvre et de calibration précises. La détection des MES par acoustique a été expérimentée sur la bouée SCENES et a fournis de bons résultats (Poppeschi *et al.*, 2024). En revanche, les capteurs de sel nutritifs n'ont pas produit de mesures fiables.

Les actions réalisées dans le cadre de la phase 2 du projet PHRESQUES se sont déroulées sur la période de juillet 2019 à juin 2024 et dont les objectifs initiaux s'inscrivent dans le prolongement de la phase 1 : le renforcement du méta-réseau, l'innovation, la valorisation des données et l'animation du réseau d'acteurs. Au terme de cette seconde phase, le méta-réseau HF (haute fréquence, mesures toutes les 5 à 15 min) PHRESQUES, est composé du réseau MeSeine en Région parisienne (SIAAP), SYNAPSES en estuaire (GIP Seine-Aval) et COAST-HF en baie de Seine (UMR-BOREA et IFREMER). Il est composé de 12 stations, dont deux nouvelles : Vatteville-la-Rue et Poses [Figure 2]. Les actions de renforcement menées dans le cadre de la phase 2 de ce projet sont détaillées en partie I du rapport.

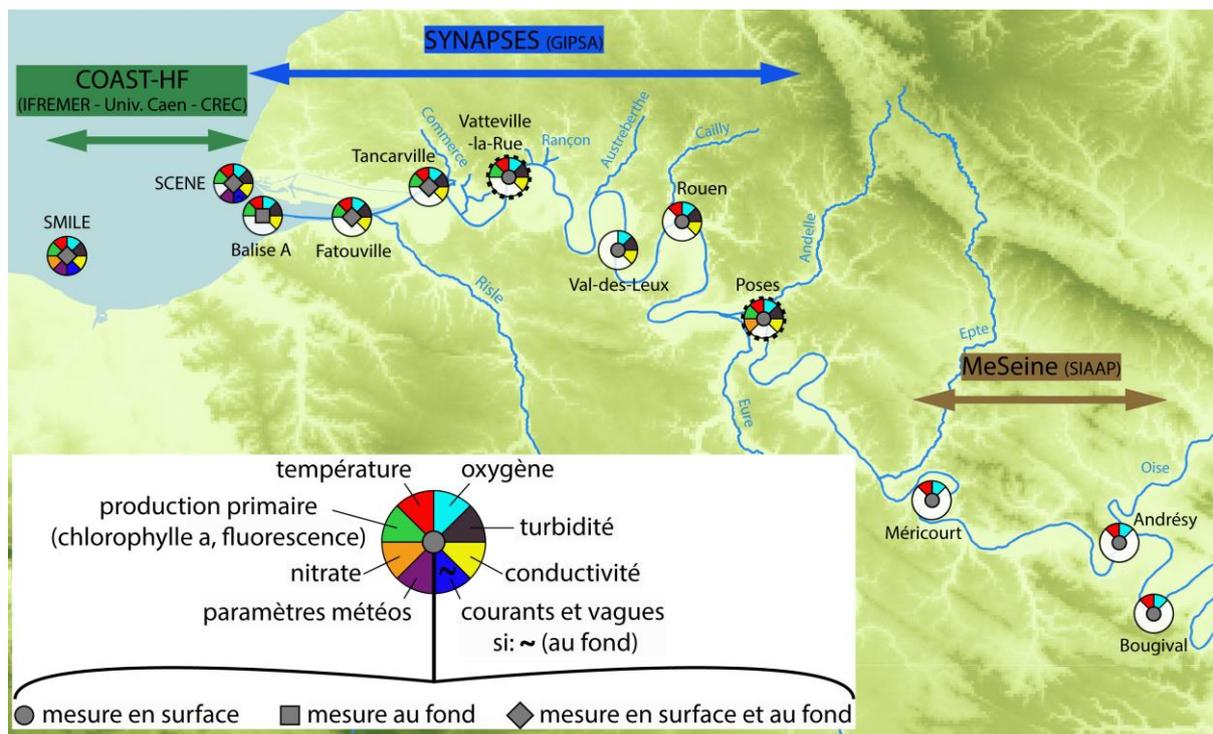


Figure 2 : Position des stations du méta-réseau et des paramètres mesurés à chaque station dans le cadre du projet PHRESQUES. Les deux nouvelles stations sont entourées en pointillé noir (Vatteville-la-Rue en aval et Poses en amont).

Étant donné la variété des processus le long du continuum et les objectifs propres à chacun des réseaux, les paramètres mesurés aux stations varient. Cependant, plusieurs sont communs à toutes les stations et forment la colonne vertébrale du réseau PHRESQUES : température, oxygène dissous, turbidité et conductivité. La turbidité et la conductivité sont mesurées et diffusées dans toutes les stations de la baie de Seine et de l'estuaire [Figure 2]. Ensuite, la conductivité est convertie en salinité à toutes les stations de Vatteville-la-Rue à la mer. La mesure de la fluorescence de la chlorophylle α , quant à elle, est effectuée au niveau de toutes les stations, à l'exception de Vatteville-la-Rue, Val-des-Leux et Rouen. D'autres paramètres spécifiques tels que les nitrates (SMILE, Poses), ou encore des paramètres hydrométéorologiques et la fluorescence multispectrale (SMILE et SCENES), ne sont mesurés qu'en des points spécifiques. En lien avec son activité, le SIAAP s'intéresse également aux orthophosphates, à l'ammonium, au pH, ainsi qu'au carbone et aux matières organiques (Carbone organique dissous : COD, carbone organique total : COT). La partie du réseau MeSeine intégré au méta-réseau PHRESQUES est composée de deux stations multiparamètres (Andréy, Bougival) et une biparamètre (Méricourt, mesurant la température et l'oxygène). Quatre stations biparamètres (permanentes ou bouées temporaires) et deux stations multiparamètres supplémentaires composent ce réseau à l'aval de Paris. Les périodes de mesures des différents paramètres sont résumées dans le Tableau I.

Tableau I : Tableau récapitulatif des périodes théoriques de mesure (i.e. mesures aberrantes et disfonctionnement non pris en compte) des différentes stations dans le cadre de PHRESQUES (à partir de la donnée la plus ancienne).

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
coast HF	SMILE (surface)															
	SMILE (fond)															
	SCENES (surface)															
	SCENES (fond)															
SYNAPSES	Balise A (fond)															
	Fatouville (surface)															
	Fatouville (fond)															
	Tancarville (surface)															
	Tancarville (fond)															
	Vatteville-la-Rue (surface)															
	Val-des-Leux(surface)															
	Heurteauville (surface)															
	Rouen (surface)															
	Poses (surface)															
MeSeine	Méricourt (surface)															
	Andrésey (surface)															
	Bougival (surface)															

Le plan du présent rapport reprend les quatre axes du projet PHRESQUES, à savoir le renforcement du méta-réseau, les actions d’innovation, la valorisation et l’animation. Des perspectives sont également proposées.

AXE 1 - RENFORCEMENT DU META-RESEAU

La phase 2 du projet PHRESQUES a permis de renforcer le méta-réseau avec 1) un nouveau point de mesure à l'interface fleuve/estuaire (*i.e.* Poses) ; et 2) une étude faisabilité pour une station à l'interface estuaire/baie (*i.e.* Fatouville). Le renforcement du méta-réseau aux interfaces reste déterminant pour mieux caractériser les échanges liquides/solides et mieux comprendre la dynamique biogéochimique le long du continuum Seine. Il doit également permettre la mutualisation de l'acquisition de données et un accès facilité à ces dernières. La mise en place de telles stations reste complexe et ne peut pas toujours déboucher sur leur mise en œuvre effective.

1. Station à l'interface fleuve/estuaire (Poses)

a. Mise en place de la station

Lors de la phase 1 du projet PHRESQUES, l'installation d'une station de mesure fixe sur le site de Portejoie (commune de Porte-de-Seine) n'a pas débouché, du fait de difficultés diverses (accessibilité, propriété des berges, alimentation électrique). Elles ont conduit à un budget sous-estimé et un appel d'offres infructueux. Cette action, portée initialement par l'IPGP, s'est retrouvée orpheline et a été reportée en phase 2 du projet, avec des ambitions revues à la baisse (bouée équipée de sondes plutôt qu'une station expérimentale en dur) et un portage assuré par le GIP Seine-Aval.

Un prestataire (société DTEK) a été sélectionné pour mettre en place une bouée instrumentée sur un ponton privé à Poses [Figure 3]. Ce dispositif a été mis en service le 15/12/2023. La bouée est équipée d'une sonde multiparamètres EXO2s placée à 1 m sous la surface. Elle doit fonctionner conjointement avec un courantomètre DCS AANDERAA installé en pied du fourreau de la bouée¹. Plusieurs paramètres sont mesurés à haute-fréquence (5 min) sur cette bouée : conductivité, température, chlorophylle a^2 , turbidité, oxygène dissous et nitrate. Le nettoyage de ces capteurs est assuré automatiquement avec un balai (fréquence de nettoyage de 10 min) et une maintenance toutes les 8 semaines. Le dispositif est équipé d'un système de télétransmission des mesures vers la plateforme web développée par XYLEM « Hydrosphère ».

A noter, la mesure d'un nouveau paramètre sur cette station à l'interface fleuve/estuaire : les nitrates. Ce paramètre est relié à une problématique d'importance pour la Seine, car réaliser cette mesure à haute fréquence va permettre de mieux caractériser les flux de nitrates entrant dans l'estuaire. Comprendre la variabilité de ces apports permettra d'affiner la stratégie à mettre en place afin de réduire les flux rejoignant la baie de Seine en accord avec la réglementation environnementale (DCE, DCSMM).

¹ Le courantomètre n'est toujours pas fonctionnel (septembre 2024) à cause de problèmes techniques liés à l'instrument, puis à la télétransmission des données.

² Les données mesurées sont considérées comme valides, à l'exception de la mesure de la fluorescence de la chlorophylle a qui est jugée aberrante.

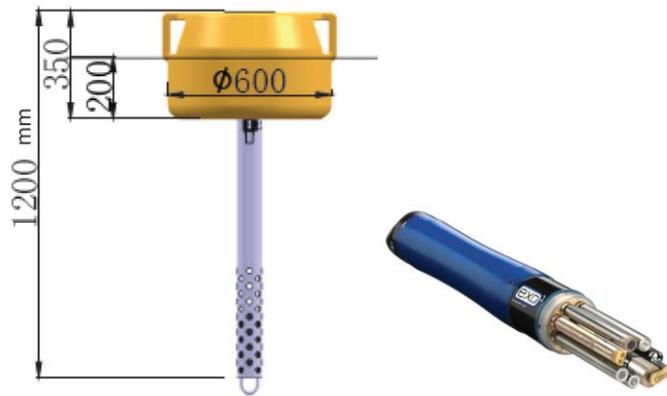


Figure 3 : Schéma de la bouée instrumentée déployée à Poses et de la sonde multiparamètres EXO2s (0-100 m).

b. Premières analyses des données acquises

Les chroniques de plusieurs de ces paramètres ont été tracées et comparées aux mesures effectuées au niveau d'autres stations [Figure 4]. Ces comparaisons ont mis en avant la cohérence des mesures effectuées à Poses avec les stations le long du continuum. C'est notamment le cas de la turbidité entre Poses et Rouen [Figure 4], on observe une hausse de la turbidité directement reliée à l'augmentation du débit au niveau des deux stations et dans les mêmes proportions. Cette augmentation de la turbidité est d'abord visible à Poses, puis à Rouen avec des patterns presque identiques [Figure 4].

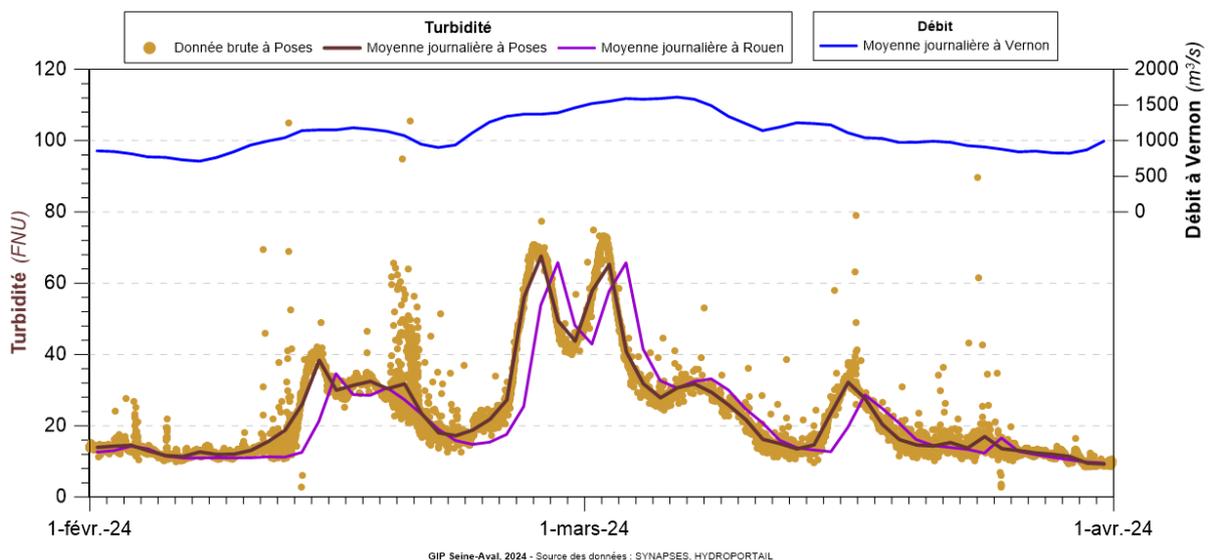


Figure 4 : Comparaison des mesures de turbidité effectuées à Poses (marron) et à Rouen (violet), ainsi que le débit mesuré à Vernon (bleu).

Le même exercice a été réalisé entre les mesures de nitrates à Poses et celles effectuées par l'Agence de l'Eau Seine Normandie sur le même site (AESN, base de données NAIADES), montrant des ordres de grandeurs comparables [Figure 5].

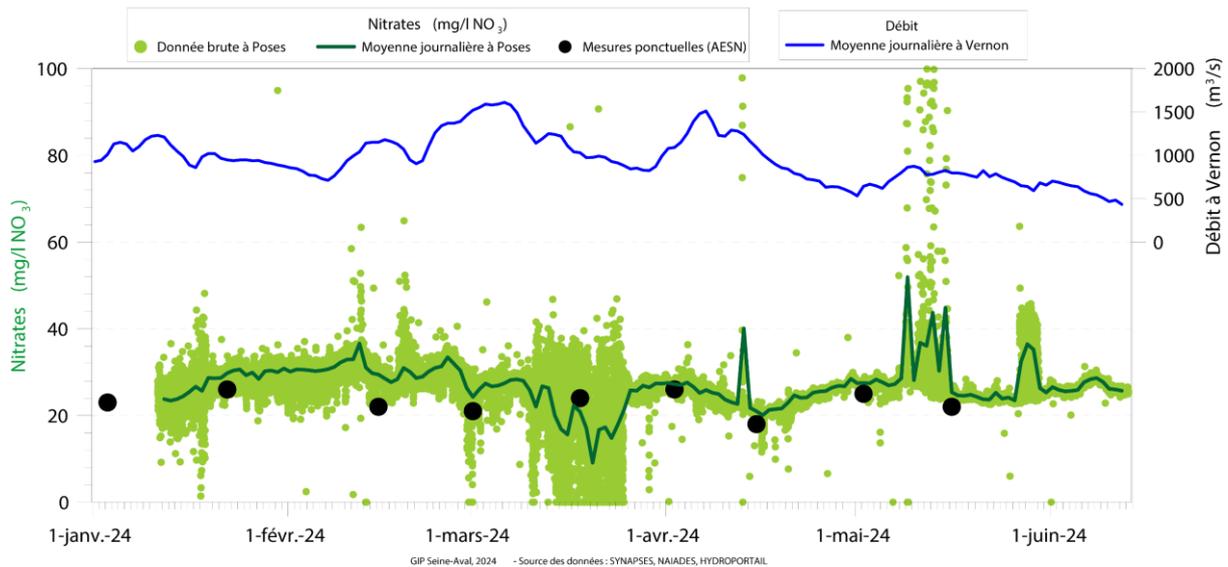


Figure 5 : Comparaison des mesures de nitrates effectuées à Poses (vert) et des mesures ponctuelles réalisées par l'AESN (noir), ainsi que le débit mesuré à Vernon (bleu).

Concernant les mesures d'oxygène à l'interface fleuve/estuaire, elles permettent notamment de suivre l'évolution spatiale des creux d'oxygène régulièrement observés dans la Seine francilienne, en lien avec des rejets d'eaux usées partiellement traitées lors d'orages par exemple. Ce suivi spatial permet de contrôler la récupération du milieu, avec des concentrations qui re-augmentent à Poses et plus significativement à Rouen [Figure 6]. Ces comparaisons vont permettre de mieux identifier l'origine de ces creux d'oxygène et leur dynamique.

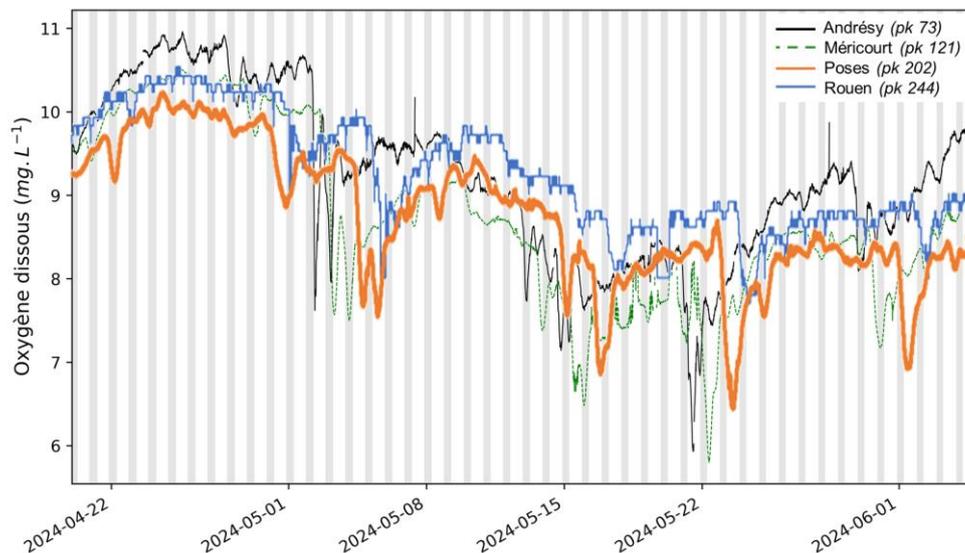


Figure 6 : Comparaison des mesures d'oxygène effectuées à Andrésey, Méricourt (MeSeine), Poses et Rouen (SYNAPSES).

c. Représentativité des mesures

En complément de l'acquisition des données haute-fréquence à Poses, une étude de leur représentativité est menée par le laboratoire M2C (Université de Rouen Normandie), via l'acquisition de données *in situ* complémentaires. Cette étude doit permettre de caractériser la représentativité et aider à l'interprétation des mesures effectuées à la station du site de Poses par rapport à la variabilité spatiale au droit de cette dernière. Pendant deux ans (2024-2025), quatre campagnes annuelles basse fréquence (mesures toutes les 6 h pendant 10 jours), ainsi que deux campagnes haute fréquence (événements spécifiques) sont prévues. Ces campagnes se composent de transects ADCP (courantomètre acoustique) [Figure 7], de prélèvements d'eau (pesées des MES) et de profils verticaux (granulomètre laser et sonde multiparamètres).

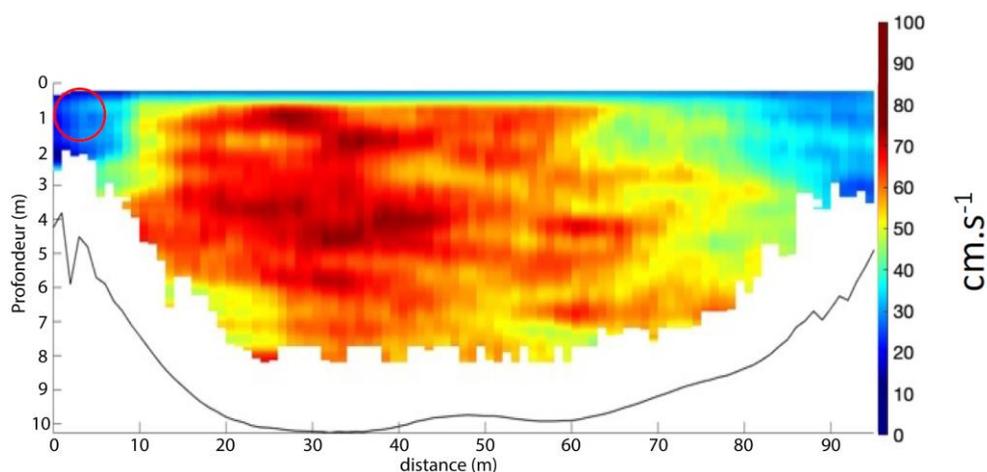


Figure 7 : Profil de courant réalisé au droit de la station de Poses, le rond rouge représente l'emplacement de la station de Poses (pers. comm. Lemoine J.P.).

Les conclusions sur la représentativité de cette station seront disponibles à l'issue des campagnes de mesure, fin 2025. Le projet étant dans sa phase initiale, il est trop tôt pour conclure sur la représentativité de la station de Poses. Cependant, les premiers résultats montrent que la bouée est située dans une zone calme en comparaison du reste de la section [Figure 8]. Cette observation est commune à de nombreuses stations situées à proximité des berges. En revanche, le calcul des MES, via les profils verticaux réalisés, révèle que l'emplacement de la station semble être représentatif de la moyenne observée le long de la section [Figure 8]. Il faudra vérifier, avec les prochaines campagnes de mesure, si ces observations préliminaires se confirment dans différentes conditions hydrologiques.

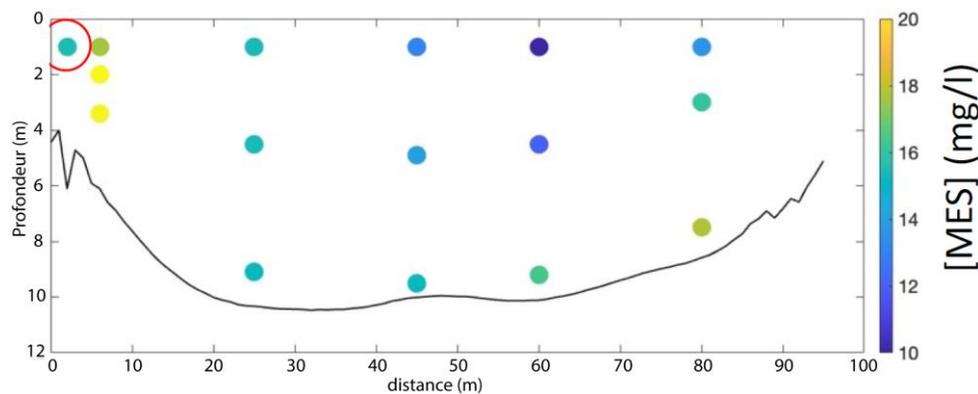


Figure 8 : Concentrations en matière en suspension (MES) le long du transect au droit de la station de Poses, le rond rouge représente l'emplacement de la station de Poses (pers. comm. Lemoine J.P.).

Au-delà de l'intérêt de ce projet pour la station de Poses, ces campagnes de terrain vont permettre de préciser les variabilités temporelles des processus suivis en lien avec les cycles hydrologiques et d'actualiser les estimations des flux liquides et solides entrant en estuaire.

A RETENIR

L'installation d'une station à l'interface fleuve/estuaire est effective depuis décembre 2023 et un premier jeu de données est disponible. Les premiers enregistrements démontrent l'intérêt stratégique de cette station qui assure une continuité entre les réseaux du SIAAP et du GIP Seine Aval. Elle va permettre de compléter notre connaissance de l'évolution de nombreux phénomènes le long du continuum, telle que la production primaire ou la propagation des déficits en oxygène. Elle va également permettre de connaître les flux sédimentaires entrant dans l'estuaire et ainsi, en association avec les autres stations du réseau, mieux comprendre l'évolution des flux sédimentaires en estuaire et en baie. Ces données contribueront également à calibrer les modélisations numériques.

Plus d'information : GIP Seine Aval – CEREMA/M2C

2. Station à l'interface estuaire/baie (Fatouville)

Dans le but de consolider le réseau et d'apporter une plus grande flexibilité d'accès à la mesure *in situ* aux équipes scientifiques, il a été proposé d'étudier la faisabilité du déploiement d'une station laboratoire à la limite aval de l'estuaire. Localisé à environ 3 km en amont du pont de Normandie [Figure 9], l'emplacement visé permettrait d'effectuer des mesures dans la zone du bouchon vaseux, avec une station laboratoire accessible depuis la terre, dans laquelle des équipements pourront être facilement déployés pour effectuer des tests dans tout type de condition. Sa structure massive devra permettre son exploitation dans des conditions de travail sécurisées pour les conditions d'agitation observées au droit du site d'implantation. Une étude de faisabilité technique a été menée par la société Accoast, détaillant l'état de conservation du ponton en béton présent et proposant une solution technique pour la mise en place de la station (Levallois, 2020). Un cahier des charges détaillé de la nouvelle station a également été rédigé en préparation de la consultation des entreprises. Il comprend notamment la description du ponton [Figure 10], des usages prévus, de l'équipement (dont l'alimentation en énergie), de l'accès à la structure, ainsi qu'un budget prévisionnel. Des données complémentaires y sont incluses

concernant : les charges d'exploitation, la durée de vie minimum demandée, les dimensions du navire projet relié à la station et des conditions environnementales auxquelles sera soumise la plateforme.



Figure 9 : Localisation du site de Fatouville. Sur la photographie de droite, le ponton considéré est la structure située juste en aval du marégraphe de Fatouville (Levallois, 2020).

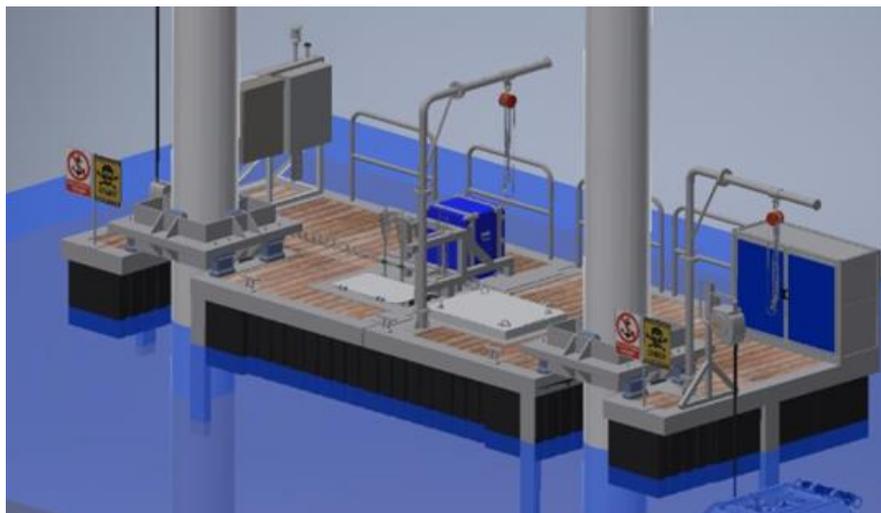


Figure 10 : Vue schématique du ponton scientifique flottant, dans le cas d'une implantation par pieux (Levallois, 2020).

En complément de l'étude de faisabilité technique, une expertise juridique (Dereux, 2021) a été menée sur les implications, notamment assurantielles, en cas d'accident ou d'avarie sur la station. Ces divers éléments ont imposé de ne pas développer plus avant ce projet (COFIL du 09/06/2024) et de se reporter sur 1) la mise en place de la station à l'interface fleuve/estuaire portée par le GIP Seine-Aval ; 2) le renforcement de la station SCENES et des stations SYNAPSES implantée à Fatouville, en collaboration avec HAROPA Port.

A RETENIR

L'opportunité d'installer une station à l'interface entre estuaire/baie pour disposer de mesures dans la zone du bouchon vaseux a été étudiée à travers une étude de faisabilité technique. Cette dernière a permis la rédaction d'un cahier des charges. Suite à une expertise juridique, le projet d'installation n'a pas été poursuivi par le GIP Seine-Aval.

Plus d'information : Levallois, 2020 – GIP Seine Aval – IFREMER

AXE 2 - INNOVATION

Les actions d'innovation menées dans le cadre de la phase 1 du projet PHRESQUES avaient pour objectif de tester de nouvelles technologies de mesure disponibles sur le marché et mettre en place une méthodologie de mesure des matières en suspension (MES) basée sur des ADCPs (courantomètres). Cette phase a également permis de tester les capteurs de matière organique (TRIOS), de production primaire (FluoroProbe BBE), de sels nutritifs (auto-analyseur). Ces tests ont démontré : (i) la possibilité d'utiliser les sondes TRIOS pour suivre le carbone, (ii) l'incapacité des auto-analyseurs à fournir des mesures fiables de sels nutritifs en estuaire et (iii) des mesures de production primaire par fluorescence et de nitrate (optiques) prometteuses. Des tests complémentaires étaient à prévoir pour caractériser la fiabilité des mesures de ces deux derniers paramètres. La méthodologie de mesure des MES par ADCPs n'a malheureusement pas pu être mise en place sur le réseau SYNAPSES étant donné qu'elle nécessite des stations fixes et que ni la station à l'interface estuaire/Baie (Fatouville), ni la station à l'interface fleuve/estuaire (Poses), n'ont été réalisées en phase 1. Cependant, la méthodologie a été testée et validée sur la bouée SCENES (Poppeschi *et al.*, 2024).

Les actions d'innovation menées en phase 2 se sont donc concentrées sur l'étude des performances des capteurs de nitrate et de production primaire en estuaire (Claquin *et al.*, 2024), ainsi que la caractérisation du mélange sablo-vaseux des MES grâce à une nouvelle méthodologie de couplage des mesures optiques et acoustiques (Verney *et al.*, 2024c). L'amélioration de la précision de ces trois mesures représentent des cibles stratégiques pour la compréhension de la dynamique de l'estuaire, à savoir : (i) obtenir une mesure fiable des flux de nitrate dans l'estuaire pour affiner la stratégie à mettre en place afin de réduire les flux rejoignant la baie de Seine (DCE, DCSMM) ; (ii) mettre en place des mesures de production primaire (à la place de mesurer un proxy tel que la fluorescence de la chlorophylle a) pour comprendre le fonctionnement de la base de chaîne trophique dans l'estuaire ; (iii) être en mesure de mesurer les sables en suspension pour prendre en compte la totalité des MES dans les calculs de flux et bilans sédimentaires et non uniquement la partie fine (*i.e.* les vases).

1. Capteurs innovants liés aux cycles biogéochimiques

a. Capteurs optiques de nitrate

Durant la phase 2, quatre types de capteurs optiques de nitrates OPUS adaptés aux eaux douces (FRESH WATER), saumâtres (BRACKISH WATER) et marines (SEA WATER : SALT 1 et 2) ont été testés, ainsi qu'un capteur NITRALED associé aux sondes YSI déployées dans le réseau SYNAPSES. Ces tests ont eu pour objectif de déterminer la fiabilité de tous ces capteurs pour différentes concentrations de salinité et turbidité.

La procédure mise en place consiste à réaliser des tests en laboratoire, en mésocosme et *in situ* afin de fiabiliser les mesures le long du continuum. Les mesures *in situ* ont été réalisées lors de nombreuses campagnes de remontée de l'estuaire de Seine (de Balise A et Rouen) et en point fixe en baie de Seine (au niveau de la bouée SMILE). Les tests effectués en laboratoires sont constitués de 6 expérimentations (réalisées en triplicat), afin de tester une gamme de concentration de nitrates (0, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500, 700 et 750 $\mu\text{mol/l}$) dans six conditions différentes :

- Gamme de nitrate appliquée avec différentes concentrations de MES (0.1, 0.25 et 0.5 g/l) et une salinité nulle

- Gamme de nitrate appliquée avec une salinité de 5 et de 10 g/l et une turbidité nulle.
- Gamme de nitrate appliquée sur des conditions de salinité et de turbidité nulles.

L'impact des MES sur la concentration mesurée en nitrates est exploré via un second type d'expérimentation (également en triplicat), avec une concentration de nitrate constante (100 $\mu\text{mol/l}$), une salinité nulle et des MES variant de 0 et à 4.5 g/l au cours du temps.

Les travaux révèlent différents degrés de précision selon les capteurs et les conditions de salinité. En résumé, les capteurs OPUS BRACK, SALT 1 et SALT 2 offrent une meilleure précision pour les mesures de NO_3 dans des environnements à salinité variable, en particulier pour les concentrations de NO_3 allant jusqu'à 600 $\mu\text{mol/l}$ [Tableau II]. L'OPUS FRESH, montre des limitations significatives au-delà de 200 $\mu\text{mol/l}$. Globalement, les OPUS SALT 1 et 2 effectuent des mesures bonnes à moyennes dans toutes les gammes de salinité testées. L'OPUS BRACK montre même des performances supérieures au capteur SALT 1 pour de fortes concentrations en NO_3 , mais n'effectue des mesures fiables que pour des concentrations en NO_3 supérieures à 100 $\mu\text{mol/l}$ en présence de sel.

Tableau II : Résumé de la qualification des données issues des OPUS et du capteur YSI NITRALED testés dans différentes concentrations de salinité. (vert = mesure juste et précise ; orange = mesure non juste, mais précise ; rouge = mesure ni juste, ni précise ; Claquin et al., 2024).

	FRESH			BRACK			SALT 1			SALT 2			NITRALED		
Concentration en NO_3 attendu	0	vert	rouge	rouge	vert	rouge	rouge	vert	vert	vert	vert	rouge	rouge	rouge	
	2	rouge	rouge	rouge	vert	rouge	rouge	vert	vert	vert	vert	rouge	rouge	rouge	
	5	rouge	rouge	rouge	vert	rouge	rouge	vert	vert	vert	vert	rouge	rouge	rouge	
	10	rouge	rouge	rouge	vert	rouge	rouge	vert	vert	vert	vert	rouge	rouge	rouge	
	25	rouge	rouge	rouge	vert	rouge	rouge	vert	vert	vert	vert	vert	rouge	rouge	
	50	rouge	rouge	rouge	vert	rouge	rouge	vert	vert	vert	vert	vert	rouge	rouge	
	100	rouge	rouge	rouge	vert	rouge	rouge	vert	vert	vert	vert	vert	rouge	rouge	
	250	rouge	rouge	rouge	vert	orange	orange	orange							
	500	rouge	rouge	rouge	orange	orange	orange								
700	rouge	rouge	rouge	orange	orange										
750	rouge	rouge	rouge	orange	orange										
	0	4,3	8,5	0	4,3	8,5	0	4,3	8,5	0	4,3	8,5	0	5	10
	Salinité (g.L^{-1})														

Tableau III : Résumé de la qualification des données issues des OPUS et du capteur YSI Nitraled testé dans différentes conditions de MES. (vert = mesure juste et précise ; orange = mesure non Juste, mais précise ; rouge = mesure ni juste, ni précise ; Claquin et al., 2024).

Concentration en NO3 attendu	FRESH				BRACK				SALT 1				SALT 2				NITRALED			
	0	0,1	0,25	0,5	0	0,1	0,25	0,5	0	0,1	0,25	0,5	0	0,1	0,25	0,5	0	0,1	0,25	0,5
0	vert	vert	orange	rouge	vert	vert	vert	rouge	vert	rouge	rouge	rouge	vert	vert	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge
2	vert	vert	orange	rouge	vert	vert	vert	rouge	vert	rouge	rouge	rouge	vert	vert	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge
5	vert	vert	orange	rouge	vert	vert	vert	rouge	vert	rouge	rouge	rouge	vert	vert	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge
10	vert	vert	orange	rouge	vert	vert	vert	rouge	vert	rouge	rouge	rouge	vert	vert	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge
25	vert	vert	orange	rouge	vert	vert	vert	rouge	vert	rouge	rouge	rouge	vert	vert	rouge	rouge	vert	rouge	rouge	rouge
50	vert	vert	orange	rouge	vert	vert	vert	rouge	vert	rouge	rouge	rouge	vert	vert	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge
100	vert	vert	orange	rouge	vert	vert	vert	rouge	vert	rouge	rouge	rouge	vert	vert	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge
250	rouge	rouge	rouge	rouge	vert	vert	orange	rouge	orange	orange	orange	rouge	orange	orange	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge
500	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	orange	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge
700	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	orange	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge
750	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	orange	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge	rouge

En ce qui concerne les conditions de turbidité, l'ensemble des mesures sont rapidement non fiables en présence de MES. L'OPUS FRESH est impacté dès 0,2 g/l de MES, l'OPUS BRACK à partir de 0,4 g/l et les OPUS SALT 1 et OPUS SALT 2 à partir de 0,15 g/l [Tableau III]. C'est donc l'OPUS BRACK qui est le plus performant en présence de MES.

Le capteur NITRALED produit une mesure de nitrate jugée bonne, avec une salinité et une turbidité nulle, pour une gamme de mesure située entre 25 et 750 $\mu\text{mol/l}$ de nitrates. Lorsqu'on augmente la salinité, le capteur perd sa précision pour les valeurs attendues inférieures à 750 $\mu\text{mol/l}$ tout en restant acceptable (mesure moyenne) sur l'intervalle 250 - 750 $\mu\text{mol/l}$. En revanche, aucune des mesures effectuées avec les différentes concentrations en MES testées (>100 mg/l) n'est précise ou juste. Bien qu'extrêmement sensible aux MES, ce capteur a été déployé à l'interface fleuve/estuaire. En effet, les mesures effectuées à la station de Poses révèlent des conditions de turbidité très faible, avec une moyenne d'environ 23 mg/l (15/12/2023 au 19/09/2024) et un dépassement du seuil des 100 mg/l moins de 0,3 % du temps sur la même période.

A RETENIR

Cinq capteurs optiques de nitrates ont été testés dans différentes conditions de salinité et de turbidité, afin d'en déterminer les conditions d'application in situ et fiabiliser les mesures. Tous ces capteurs étant basés sur un système de mesure optique, la présence de matière en suspension affecte rapidement la mesure en interagissant avec la lumière. Selon le secteur de mesure, des capteurs différents sont donc préconisés [Tableau II et Tableau III]. Ainsi, le capteur OPUS BRACK semble être le plus polyvalent, produisant des données fiables sur la majeure partie des conditions de salinité et de turbidité rencontrées dans l'estuaire de Seine. C'est le seul capteur qui est retenu pour les futures campagnes de mesures par l'UMR-BOREA. Le capteur NITRALED est lui utilisé pour les mesures à Poses, du fait de la moindre turbidité du secteur et de l'absence de salinité.

Plus d'information : Claquin et al., 2024 – Univ. Caen – BOREA

b. Capteurs de production primaire

La chlorophylle *a* est le pigment universel de la photosynthèse chez les végétaux. Sa concentration dans l'eau permet d'estimer la quantité de phytoplancton présent dans le milieu

(biomasse chlorophyllienne). Cette biomasse est la résultante de la production primaire locale et celle apportée de l'amont à laquelle il faut retirer la consommation par le zooplancton et les filtreurs, la mortalité, l'advection... L'estimation de la production primaire par la seule mesure de fluorescence de la chlorophylle a n'est donc pas satisfaisante et de nouveaux outils de mesure basés sur la fluorimétrie variable ont été développés pour ce faire. Ces outils permettent de remplacer les mesures de production primaire traditionnelles, qui sont basées sur l'utilisation d'isotopes radioactifs (^{14}C) ou stables (^{13}C) du carbone.

La bouée SMILE est déjà équipée d'un fluorimètre Fast Repetition Rate Fluoroter (FRRf, ACT2; Chelsea Technologies). Dans le cadre de PHRESQUES, un nouveau capteur LABSTAF (Chelsea Technologies) est testé. L'équipe de l'UMR-BOREA a réalisé plusieurs tests en laboratoire et *in situ*, afin de vérifier la fiabilité des mesures effectuées, notamment pour des contextes à forte turbidité (typique des estuaires). L'effet de la turbidité sur les paramètres photosynthétiques est déterminé en laboratoire sur différentes souches de microalgues aux signatures pigmentaires différentes.

Ces travaux confirment que plus la concentration en MES est élevée, plus l'absorption et la diffusion de la lumière par les MES est forte. Ainsi, pour obtenir une activité photosynthétique équivalente à un échantillon non-turbide, une source de lumière plus intense est nécessaire. Cependant, un des objectifs de ces travaux est bien de déterminer l'impact des MES sur la mesure et pas uniquement sur l'activité photosynthétique. Les expériences menées en laboratoire ont permis de déterminer un facteur de correction des mesures des paramètres photosynthétiques pour les différentes espèces, en fonction des MES et ainsi homogénéiser la mesure dans l'estuaire et de réduire les biais.

Ce facteur est appliqué aux mesures effectuées sur le terrain durant les campagnes effectuées dans le cadre de PHRESQUES et du projet Seine-Aval 6 SARTRE (Tackx *et al.*, 2024). Les différents paramètres photosynthétiques acquis peuvent ainsi être corrigés en fonction de la concentration en MES le long de l'estuaire. Par exemple, la Figure 11 présente la correction appliquée aux valeurs de Sigma PII (nm^2/PSII), paramètre qui traduit la capacité du phytoplancton à absorber la lumière. Nous constatons que plus la teneur en MES est forte plus le facteur de correction est fort mais que la correction reste limitée au regard de la dynamique de ce paramètre le long de l'estuaire.

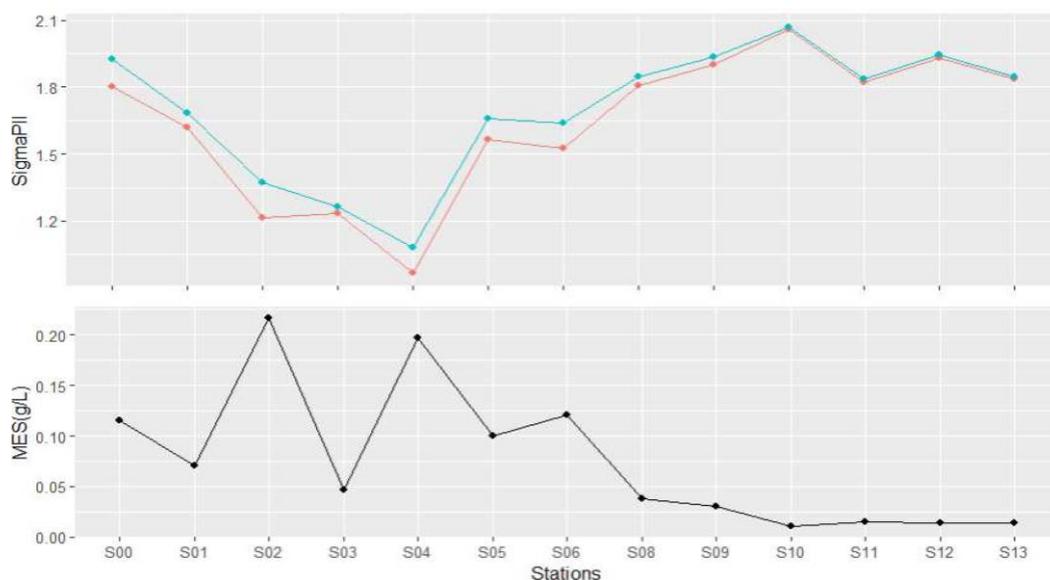


Figure 11 : Mesure du paramètre photosynthétique SigmaPII en fonction de la concentration en MES et des stations (S00 = Balise A et S13 = Rouen). Les courbes rouges sont les données non corrigées, les

courbes bleues sont les données corrigées en appliquant le coefficient de correction moyen déterminé expérimentalement (Claquin et al., 2024).

Les campagnes, réalisées à différentes périodes, révèlent une grande variabilité temporelle des paramètres photosynthétiques. La production est globalement faible en février/mars et remonte à partir du mois de mai [Figure 12]. Il semble également que les zones les plus productives se déplacent vers l'aval en période estivale et que les zones les moins productives se situent là où les concentrations en MES sont les plus fortes (pour plus de détails voir le [rapport du projet SARTRE, Tackx et al., 2024](#)).

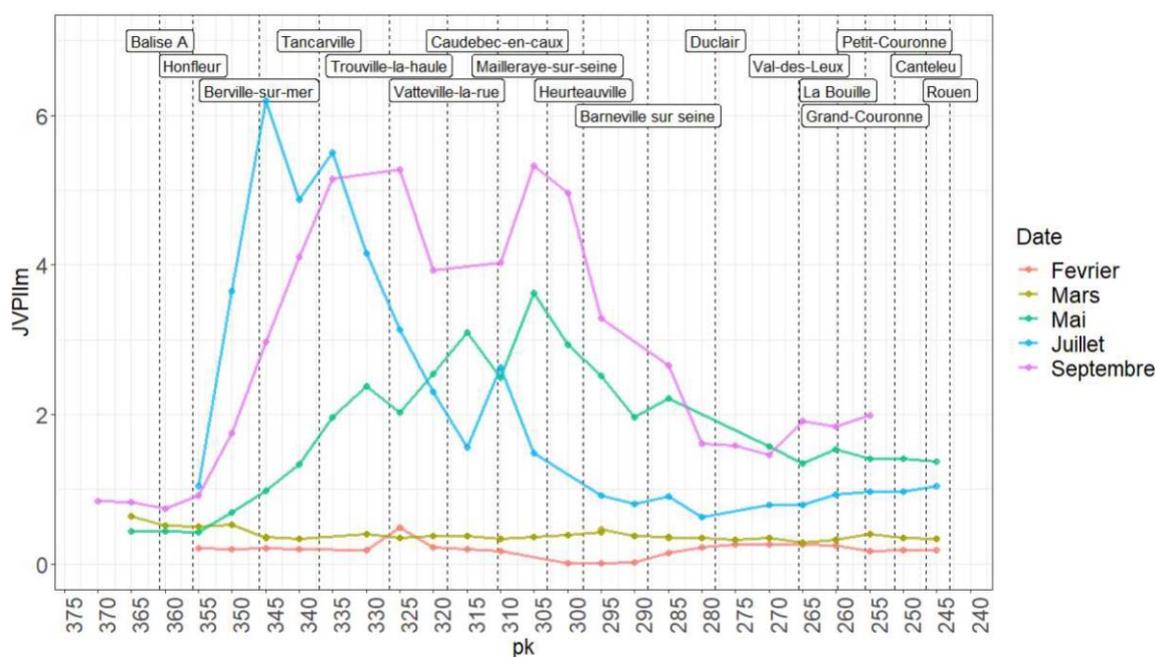


Figure 12 : Mesure d'un exemple de paramètres photosynthétiques, le JVPIm (capacité photosynthétique maximale en mmol électrons.m-3.h-1) mesuré 2021 (Claquin et al., 2024).

A RETENIR

Les nombreuses campagnes de mesures réalisées dans le cadre du projet PHRESQUES et du projet SARTRE confirment l'influence de la turbidité sur la mesure de production primaire en estuaire de Seine. Les particules en suspension interagissant avec la lumière et biaisent donc potentiellement les mesures de « fluorescence variable » réalisées ; il est nécessaire d'appliquer un facteur de correction, obtenu grâce aux expériences en laboratoire. Son utilisation révèle une différence limitée entre les données corrigées et non corrigées, indiquant que la turbidité ne biaise pas significativement les mesures photosynthétiques réalisées [Figure 11]. Néanmoins, ces corrections sont nécessaires pour effectuer des estimations précises. Le LABSTAF a démontré son intérêt pour mesurer les paramètres photosynthétiques du phytoplancton nécessaire pour estimer la production primaire autochtone. De plus, les travaux ont permis d'adapter le LABSTAF à la mesure HF long-terme, mais étant donné la sensibilité de la mesure aux MES, un contrôle régulier de la chambre de mesure est nécessaire pour éviter l'accumulation de sédiments. Pour une utilisation continue sur

une station de mesure en estuaire de Seine, un système de rinçage automatique de la chambre de mesure est nécessaire pour maintenir la précision des mesures en présence de sédiments en suspension. Ce système n'existe pas à ce jour.

Plus d'information : Claquin et al., 2024 – Univ. Caen – BOREA

2. Caractérisation des matières en suspension (MES)

a. Test du couplage optique et acoustique en laboratoire

Les MES sont classiquement mesurées à l'aide d'un turbidimètre optique, ces mesures de turbidité sont ensuite comparées et corrélées à des concentrations de MES issues de prélèvements. Les relations ainsi mises en place permettent de convertir les données de turbidités mesurées (NTU ou FNU) en concentration en matière en suspension (g/l). Ces relations sont calculées à partir de prélèvements ponctuels, qui sont représentatifs uniquement de certaines conditions hydrodynamiques. Néanmoins, les conditions hydrodynamiques extrêmes, engendrant le plus de remobilisation sédimentaire et donc les concentrations en MES les plus importantes (*e.g.* durant les tempêtes), sont difficiles à échantillonner. Le second point limitant de cette méthodologie est la sensibilité des capteurs optiques. Ils sont fiables pour détecter les sédiments fins, mais beaucoup moins sensibles à la présence de sables en suspension. Il est de plus difficile d'échantillonner le sable en suspension. Les mesures *in situ* réalisées à l'heure actuelle sont donc représentatives uniquement d'une partie de la charge particulaire en suspension.

C'est dans l'objectif de lever ce verrou scientifique sur la mesure de la fraction sableuse en suspension et ainsi mieux comprendre la dynamique des sables en estuaire, que l'IFREMER a mis en place une nouvelle méthodologie de mesure. Elle se base sur le couplage de capteurs optiques et acoustiques. En effet, les mesures optiques sont efficaces pour quantifier la charge en particules fines (vases), tandis que les mesures acoustiques sont sensibles aux sables (fins et moyens). L'hypothèse à l'origine de ces travaux est que la confrontation de la dynamique des signaux de chaque capteur doit théoriquement permettre de caractériser l'ensemble des sédiments en suspension (*i.e.* sables et vases) et de les distinguer.

La première étape de ce travail consiste à réaliser des tests dans un environnement contrôlé et avec des MES connues (en tailles et quantités). Plusieurs séries de tests mélangeant sables et vases sont réalisées dans la cuve expérimentale DEXMES [Figure 13], permettant de déployer dans le même volume test un grand nombre de capteurs optiques et acoustiques. Ces expérimentations permettent de réaliser une observation conjointe des mesures optiques et acoustiques dans un environnement où toutes les variables sont contrôlées. L'objectif étant de construire un indicateur de la composition des sédiments en sable/vase (SCI, pour Sediment Composition Index).

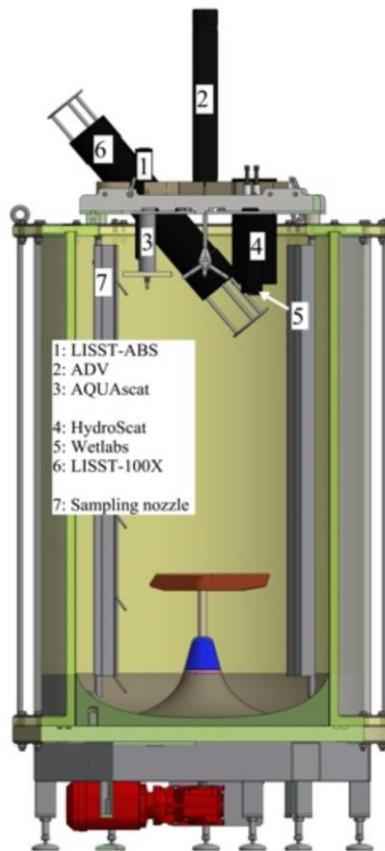


Figure 13 : Schéma du dispositif expérimental DEXMES et du déploiement des différents capteurs optiques et acoustiques (Verney et al., 2024c).

Afin d'établir une corrélation entre les mesures et la nature des MES, plusieurs paramètres sont modifiés durant les expérimentations. Les mesures sont testées en présence d'un large panel de proportion du mélange sable/vase (fraction de sable : 0%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 95%), de différentes concentrations en MES (6 différentes, réparties entre 15 mg/l et 200 mg/l) et différents types de vase et de sable. Pour chacun des tests et paliers, des prélèvements sont réalisés et traités de façon à déterminer les concentrations des différentes classes de sédiments.

Grâce à ces expérimentations, l'indice SCI (Sediment Composition Index) a pu être construit (Pearson et al., 2021). La relation entre les deux types de mesure démontre que la réponse en concentration en MES, pour un mélange donné, suit une droite linéaire dans l'espace (dB : acoustique ; log₁₀ (NTU) : optique) [Figure 14]. Le changement de mélange se traduit par différentes lignes parallèles entre elles, la distance en dB correspondant à l'indice SCI. Une fois ce concept validé, il est utilisé pour déduire la nature du mélange en suspension, en comparant les valeurs de SCI aux fractions de sables issues des expérimentations en laboratoire.

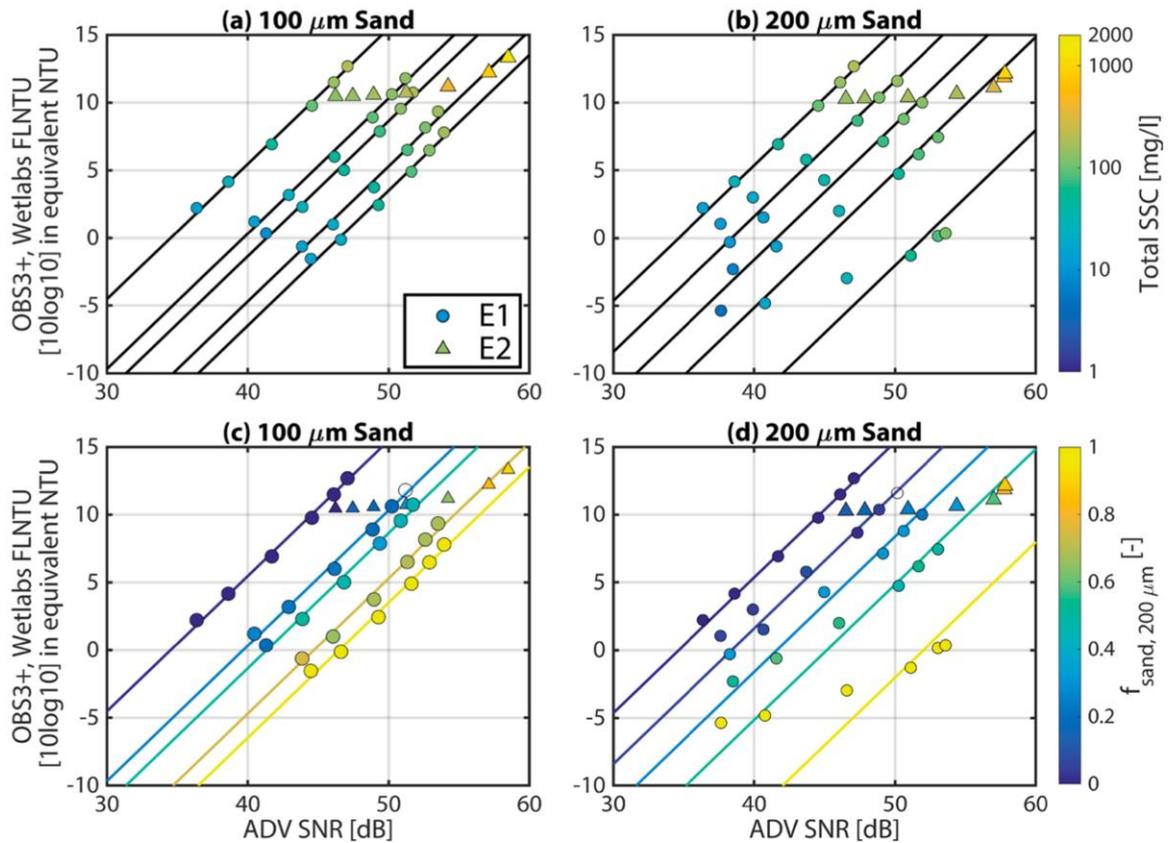


Figure 14 : Synthèse des expériences DEXMES sur la réponse combinée des capteurs optiques et acoustiques pour différentes conditions de mélanges sables/vase (S1 100 μm gauche ; S2 200 μm droite) et différents niveaux de concentration en MES (Pearson et al., 2021). Haut : l'échelle de couleur indique la concentration totale en MES ; bas : la fraction de sable en suspension (Verney et al., 2024c).

Une fois la relation entre SCI et fraction de vase établie, l'objectif de ce couplage optique et acoustique est de parvenir à estimer non plus qualitativement, mais quantitativement, les masses sableuses et vaseuses en suspension. Grâce aux expériences menées dans la cuve DEXMES, de nombreuses relations entre les concentrations en MES et les réponses des capteurs par fraction de sable sont archivées. L'objectif est donc d'associer la relation de conversion entre signal optique ou acoustique et la concentration en MES avec la fraction en vase via la bibliothèque expérimentale.

Individuellement et pour un mélange sable/vase donné, chaque capteur se caractérise également par une relation linéaire entre signal et concentration, dont la pente varie en fonction de la fraction sableuse ou en sédiments fins. Étant donné que les relations sont variables en fonction des capteurs (ainsi que des fréquences et des longueurs d'ondes) utilisés, l'ultime étape de ces travaux cherche à déterminer les meilleures combinaisons d'instruments et de paramètres pour estimer les quantités en suspension. La Figure 15 résume les tests effectués, ainsi que les incertitudes calculées à partir des capteurs acoustiques et optiques.

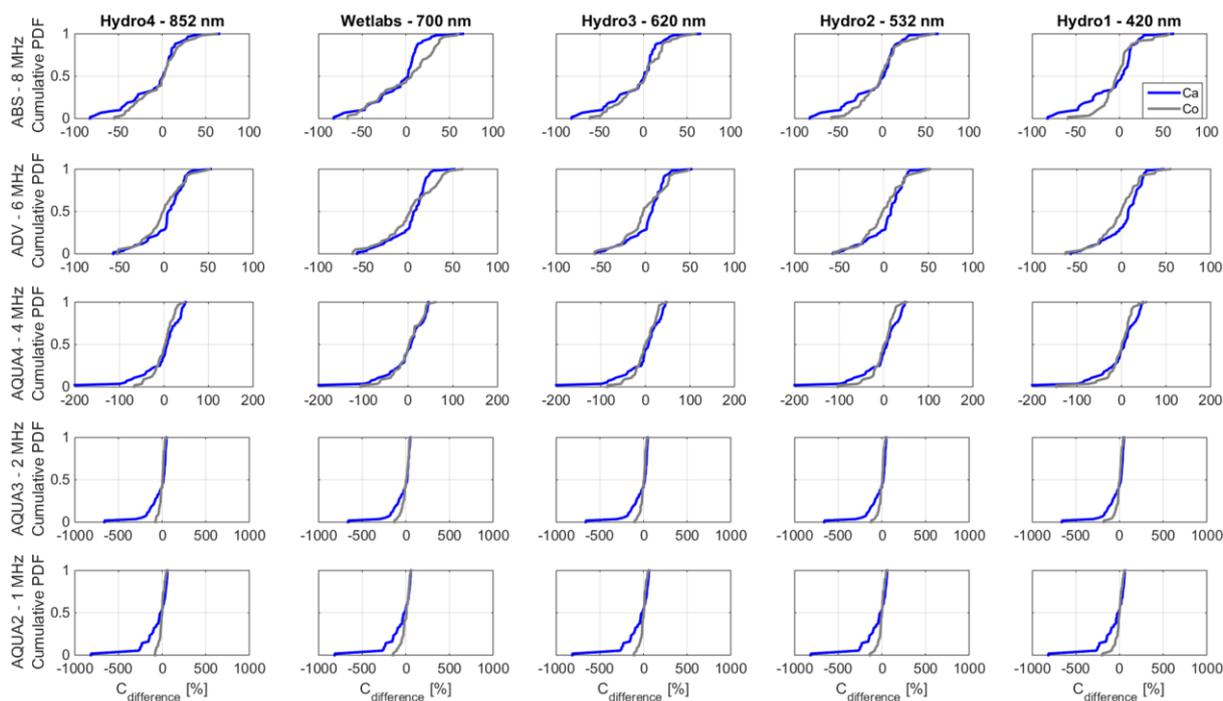


Figure 15 : Distribution cumulée des incertitudes des concentrations en MES totales calculées pour différents couples de capteurs optiques (en colonne) et acoustiques (en ligne). Les courbes bleues représentent les incertitudes calculées à partir du capteur acoustique, les courbes grises celles calculées à partir du capteur optique. Un modèle unique, indépendant des tailles de sable, est utilisé (Verney et al., 2024c).

Les résultats présentés en Figure 15 montrent que le choix de la longueur d'onde du capteur optique semble peu impacter le calcul des fractions et concentrations. A l'inverse, le choix du capteur acoustique et de la fréquence utilisée impacte fortement les résultats. Le meilleur résultat est obtenu avec l'ADV, de fréquence acoustique à 6 MHz. Pour ce capteur, les incertitudes sont toutes inférieures à +/- 50 %, et les percentiles 25/75 indiquent des incertitudes sur la concentration en MES de l'ordre de +/- 20 %. Il faut noter que le choix de la fréquence est à mettre en relation avec la taille des grains que l'on souhaite identifier. Dans le cas des sables en suspension (ici 100 μm et 200 μm) la fréquence optimale est de 6 MHz et peut varier de 4 MHz à 8 MHz, mais avec des incertitudes plus importantes sur les concentrations en MES totales.

b. Applications

La méthodologie mise en place en laboratoire est appliquée à deux sites d'étude : l'embouchure de la Seine et l'embouchure tidale d'Ameland (Pays Bas). En ce qui concerne l'estuaire de Seine, deux séries de mesures sont effectuées : une au niveau de la bouée SCENES et une seconde au niveau du banc des ratelets, dans le cadre du projet Seine-Aval 6 MORPHOSEINE (Grasso et al., 2021). Dans cette synthèse, nous aborderons uniquement une des expériences réalisées dans l'estuaire de la Seine (au niveau du banc des ratelets), à titre d'exemple.

Les données acquises dans MORPHOSEINE sont mesurées à partir d'un tripode benthique équipé d'un ADV Nortek 6MHz et d'un turbidimètre optique FLNTU Wetlabs, similaires à ceux utilisés en laboratoire. Le dispositif est déployé sur le banc des ratelets, principalement sableux, durant l'hiver 2018-2019. Les mesures effectuées ont un double objectif : éprouver la méthodologie mise en place

en laboratoire (indice SCI) et mieux caractériser la dynamique hydrosédimentaire de cette zone mal connue de l'embouchure.

Cette expérience a permis de mettre en relation les conditions hydrodynamiques et le mélange sable/vase des MES. Durant la période de mesure, l'augmentation de la contrainte induite par les vagues (wave shear stress, en $N.m^{-2}$) implique une augmentation de la teneur en sable des MES (diminution de l'indice SCI) [Figure 16]. Cette relation est notamment visible au début de la période de mesure, où la contrainte générée par les vagues est forte. Ensuite, dès que l'intensité des vagues diminue, le mélange en suspension devient de plus en plus vaseux et ce, lors des marées de vives eaux. Cette évolution peut s'expliquer par la fin de la remise en suspension de la couche superficielle du fond par les vagues et la mobilisation du bouchon vaseux par la marée, et donc une augmentation progressive des sédiments fins en suspension (augmentation de l'indice SCI). Les MES sont ensuite dominées par les vases jusqu'à l'arrivée d'une tempête le 08 janvier, qui remobilise les sédiments superficiels et ainsi, voit le mélange devenir plus sableux. 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, associé à une morte eau. Il pourrait donc être supposé que les sédiments superficiels deviennent de plus en plus sableux localement avec la succession des tempêtes [Figure 16].

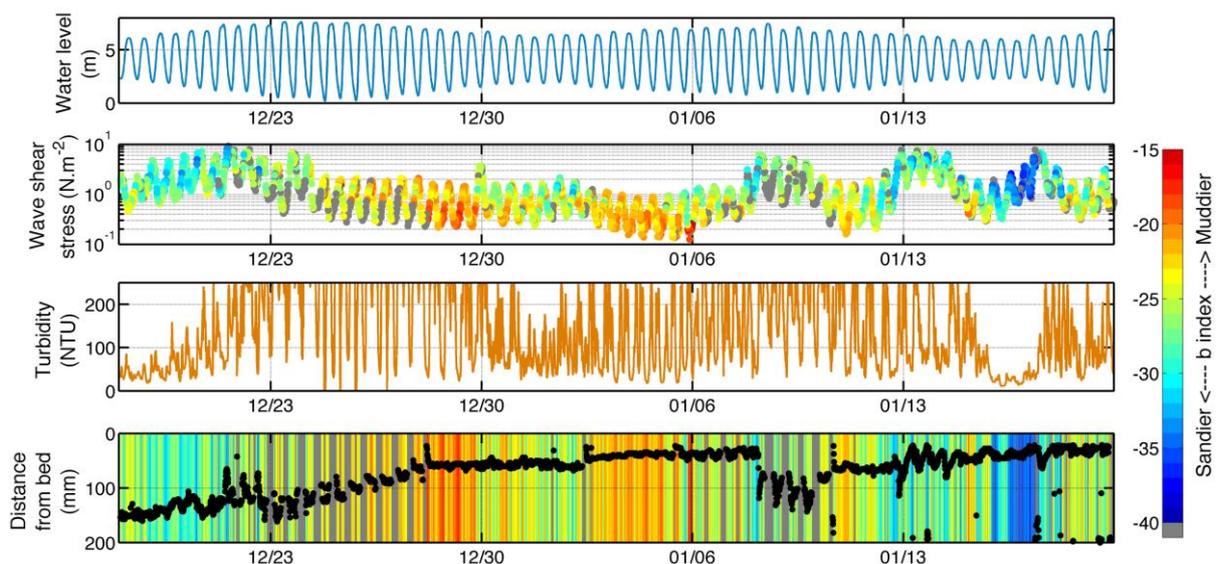


Figure 16 : Analyse de la dynamique sédimentaire sur le banc des Ratelets. Le gradient de couleur pour les panels « Wave shear stress » et « Distance from bed » correspond aux valeurs de l'indice SCI (b sur la figure) de nature des MES (Verney et al., 2024c).

A RETENIR

Des expérimentations réalisées en environnement contrôlé (cuve DEXMES) couplant des mesures optiques et acoustiques ont permis la construction d'un indicateur de la composition des sédiments en suspension en sable/vase (SCI, pour Sediment Composition Index). Cet indice SCI représente un outil novateur et extrêmement utile pour compléter notre compréhension de la dynamique des MES, généralement étudiée par la seule mesure des sédiments fins (vases). Il a notamment été appliqué à l'embouchure de la Seine pour mettre en relation les conditions hydrodynamiques et le

mélange sable/vase en suspension. Il montre une dynamique complexe, dépendante de l'intensité de différents forçages (marée et vagues) qui joue sur la répartition des différentes classes granulométriques (sables et vases). Les observations effectuées grâce à cette nouvelle méthodologie sont schématisées par Pearson *et al.* (2021) à l'échelle de la marée [Figure 17]. Ce schéma illustre la relation entre les courants de marée et la répartition sable/vase, avec une remise en suspension des sables uniquement lors des moments les plus énergétiques de la marée (flot et du jusant). Ils se redéposent rapidement dès que les courants diminuent et sont donc absents de la colonne d'eau autour des étales de marée, contrairement aux vases.

Plus d'information : Verney et al., 2024c – IFREMER

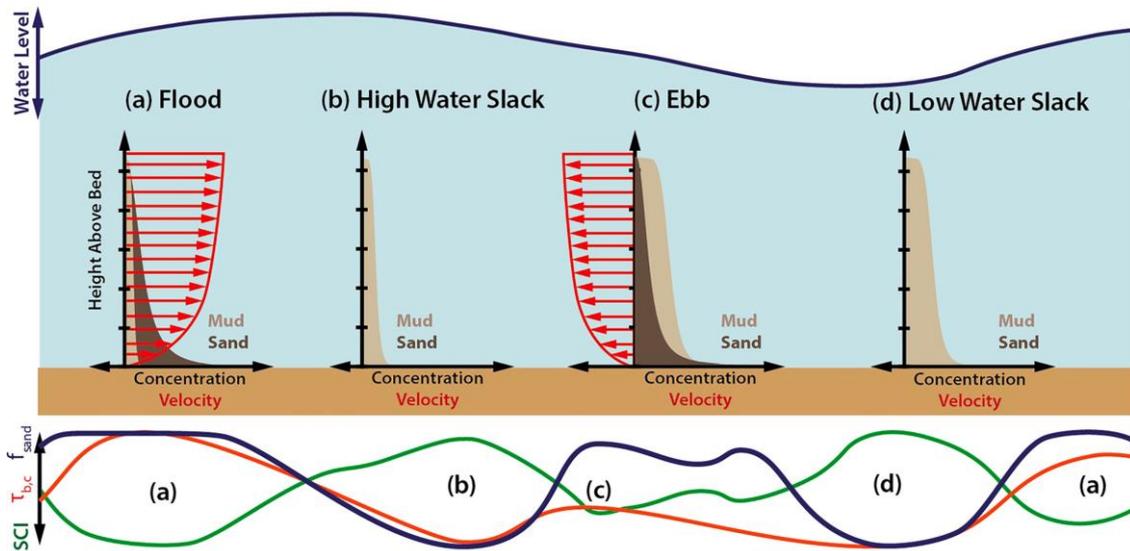


Figure 17 : Schéma de synthèse des processus hydrosédimentaires sable/vase aux embouchures tidales de la Wadden Sea (Pearson *et al.*, 2021).

AXE 3 - VALORISATION

1. Observatoire Axe Seine

a. Présentation générale de l'observatoire Axe Seine

L'observatoire environnemental de l'axe Seine (<https://www.phresques.fr/>) a été développé pour rendre compte de l'évolution des principaux paramètres suivis dans le cadre des projets PHRESQUES et BIOSURVEILLANCE, qui ont en commun l'échelle de travail (*i.e.* l'axe Seine) [Figure 18]. Cet outil englobe une interface cartographique et un volet textuel permettant la diffusion d'indicateurs dont l'analyse offre une vision évolutive de l'état de santé de la Seine et une meilleure compréhension de son fonctionnement environnemental. Quatre volets sont proposés dans l'observatoire :

- Les stations de suivi : Situation et descriptif détaillé des stations de mesure.
- La physico-chimie des eaux : Indicateurs montrant l'évolution saisonnière de la température et de la concentration en oxygène dissous, paramètres qui régissent les conditions d'accueil des organismes aquatiques en Seine.
- La biogéochimie des eaux : Indicateurs montrant l'évolution de la concentration en chlorophylle *a*, paramètre qui témoigne de l'activité biologique en Seine (indicateur non fonctionnel à ce jour).
- La santé des organismes : Niveaux d'effets génotoxiques et immunotoxiques évalués par la mesure de biomarqueurs sur des organismes aquatiques engagés dans le milieu (plus de détails sur le projet BIOSURVEILLANCE dans Xuereb *et al.*, 2023)

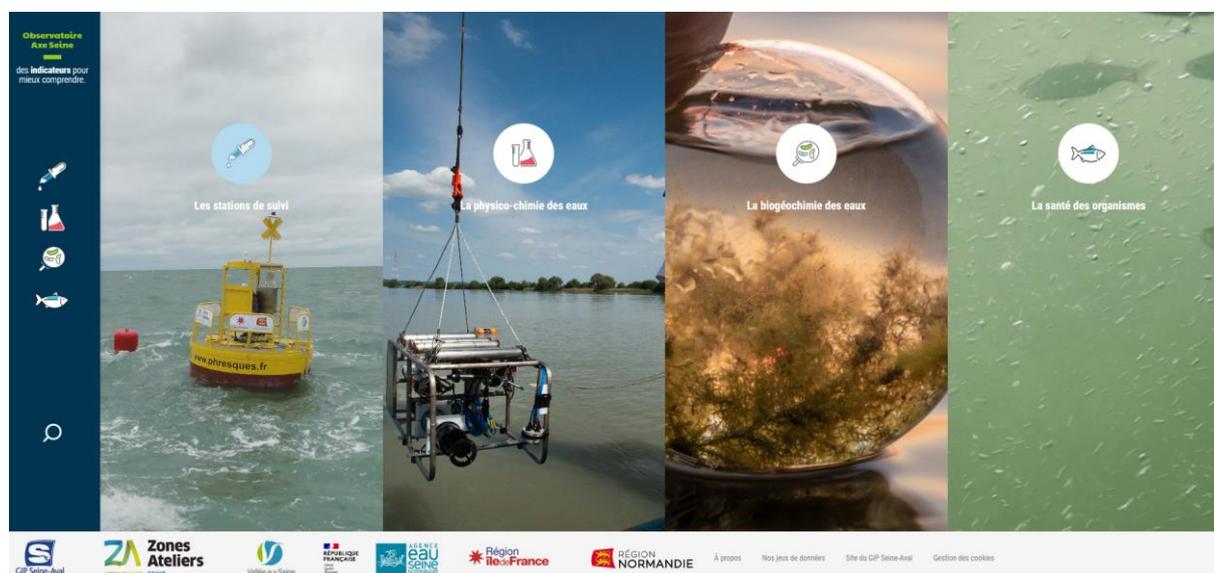


Figure 18 : Page d'accueil de l'observatoire Axe Seine.

b. Les stations de suivi PHRESQUES

Concernant le volet « Stations de suivi PHRESQUES », il donne accès aux informations suivantes pour les 10 stations du méta-réseau [Figure 19] :

- Objectif principal associé à la station
- Positionnement géographique
- Type de sonde installée et mesures réalisées
- Procédure d'entretien (calibration en maintenance)
- Gestion des données (transmission, validation)
- Bancarisation des données (lien vers la base de données ou l'interface de consultation)

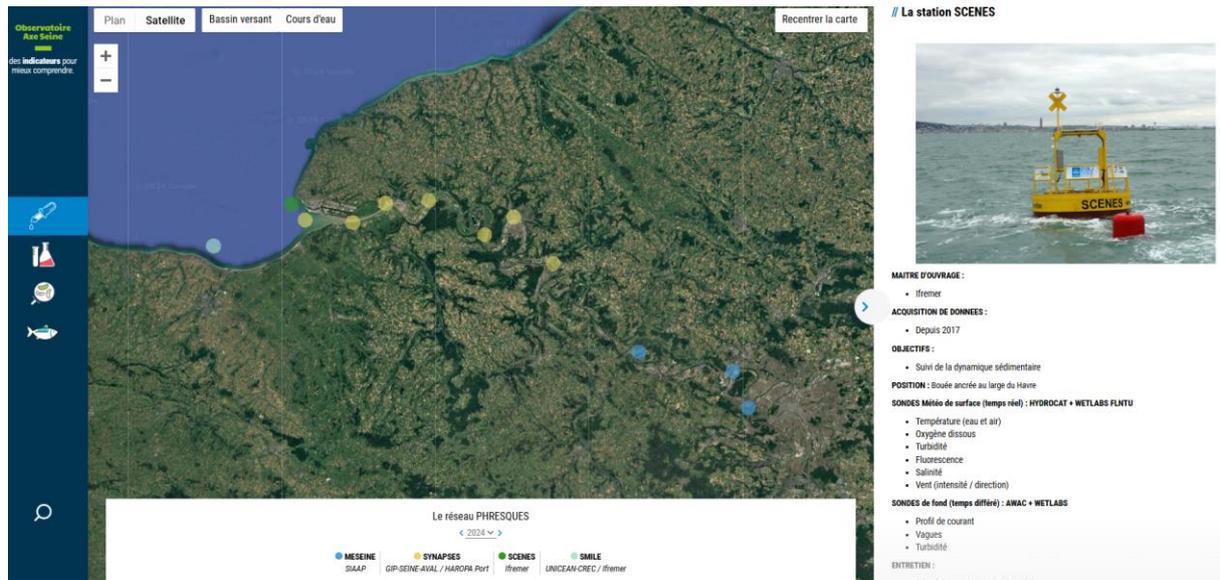


Figure 19 : Les stations de suivi – exemple de la bouée SCENES.

c. Les indicateurs Physico-chimie

Le volet « Physico-chimie des eaux » est centré sur les paramètres température et oxygénation, éléments fondamentaux pour la qualité des eaux et pour l'accomplissement du cycle de vie des organismes aquatiques. La température participe par exemple au déclenchement des processus reproductifs, alors que des températures trop élevées ou des oxygénations trop faibles impactent négativement les conditions de vie pour les organismes.

Pour la température (et l'oxygénation), quatre indicateurs sont renseignés dans l'observatoire : la température (oxygénation) moyenne, maximale et minimale (calcul à l'échelle saisonnière mis en regard des normales historiques) [Figure 20] et la durée avec une température (oxygénation) problématique pour la faune aquatique (% annuel avec une température supérieure à 23°C ; % annuel avec une oxygénation inférieure à 5 mg/l) [Figure 21]. Le suivi de ces indicateurs met notamment en évidence un gradient de température, de Paris jusqu'à l'embouchure de l'estuaire et la baie de Seine. Il met également en avant des dépassements du seuil critique de 23°C et de 5 mg/l en période estivale, sur plusieurs stations du réseau.

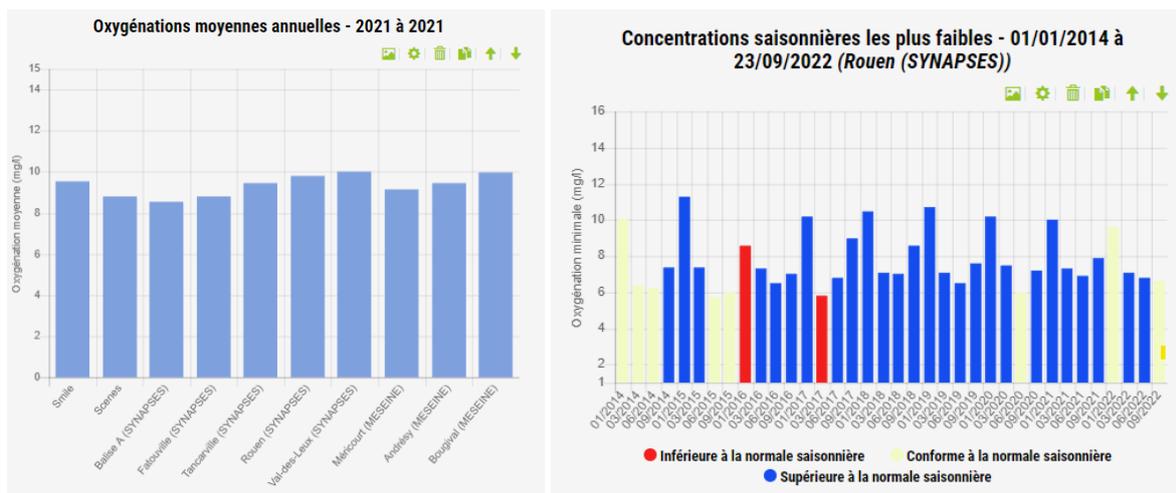


Figure 20 : Visualisation graphique de l'indicateur « Oxygénation moyenne » le long du continuum Seine pour l'année 2021 et de l'indicateur « concentrations minimales saisonnières » à Rouen (2014-2022).

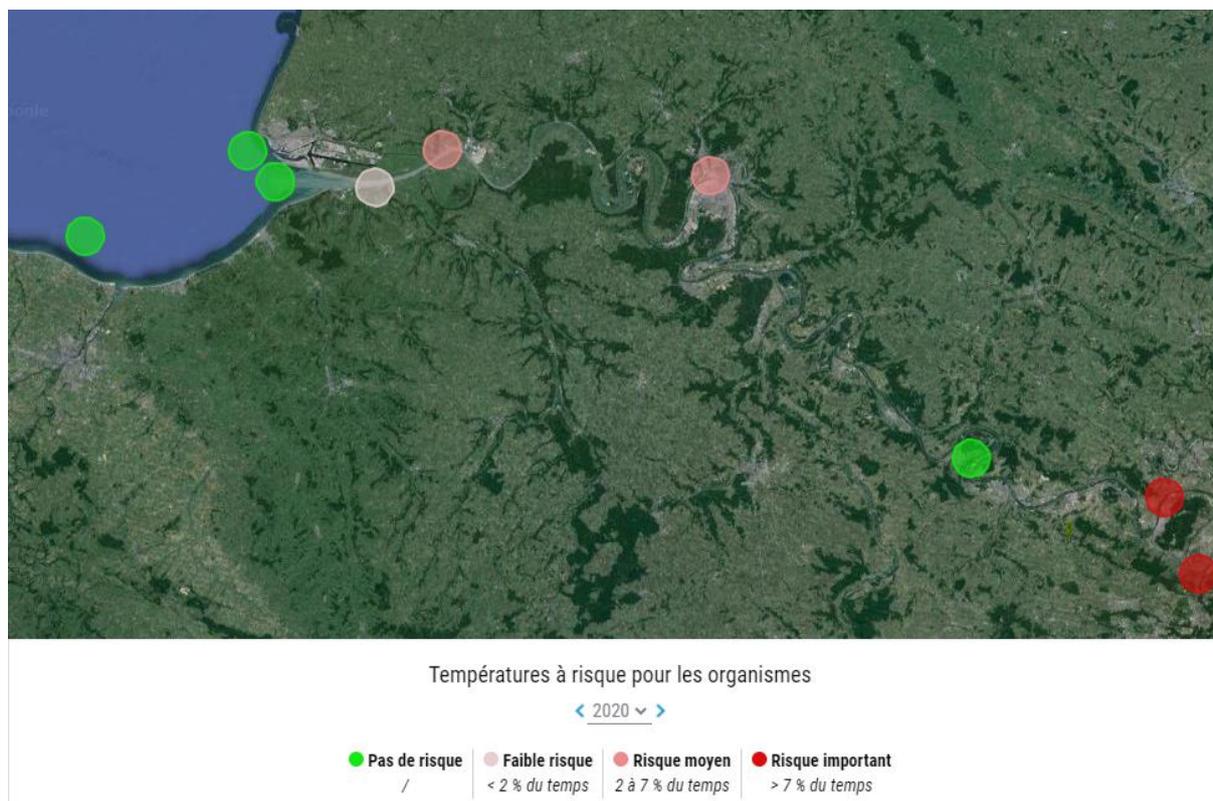


Figure 21 : Visualisation cartographique de l'indicateur « température à risque pour les organismes aquatiques » en 2020.

d. Bancarisation des données

Les indicateurs présentés ci-dessus, sont directement exportables sur le site de l'[observatoire axe Seine](#) [Figure 20]. Les données acquises et utilisées pour construire ces indicateurs sont bancarisées dans différentes bases de données, chaque acteur possédant sa propre base et restant responsable de

la diffusion de ses données. Les liens vers les différentes bases de données sont disponibles pour chaque station sur le site de l'[observatoire](#) [Figure 19]. Les indicateurs sont alimentés par les données issues des projets PHRESQUES (MeSeine, SYNAPSES, SMILE, SCENES) et BIOSURVEILLANCE, déployés en Seine :

- Les données SYNAPSES (Balise A, Fatouville, Tancarville, Val-des-Leux, Rouen, Vatteville-la-Rue) sont disponibles sur l'[interface SYNAPSES](#), de visualisation des données du GIP Seine Aval. Il est prévu d'intégrer les données acquises sur la station à Poses par la suite.
- Les données SMILE (BOREA/IFREMER) et SCENES (IFREMER) sont disponibles sur la base de données [Coriolis Côtier](#).
- Les données MESEINE (Méricourt, Andrésy, Bougival), sont fournies par le [SIAAP](#) et sont en libre accès depuis la plateforme européenne [ZENODO](#).
- Les données de génotoxicité et d'immunotoxicité sont issues du projet [BIOSURVEILLANCE](#).

e. Affichage des données en direct

Les données acquises dans l'estuaire sont également valorisées en direct, via la mise à jour en temps réel d'indicateurs sur la qualité de la Seine [Figure 22]. Ils sont accessibles sur le site web du GIP Seine-Aval (<https://www.seine-aval.fr/lestuaire-en-direct/>) et affichés sur un écran visible sur les quais à Rouen.

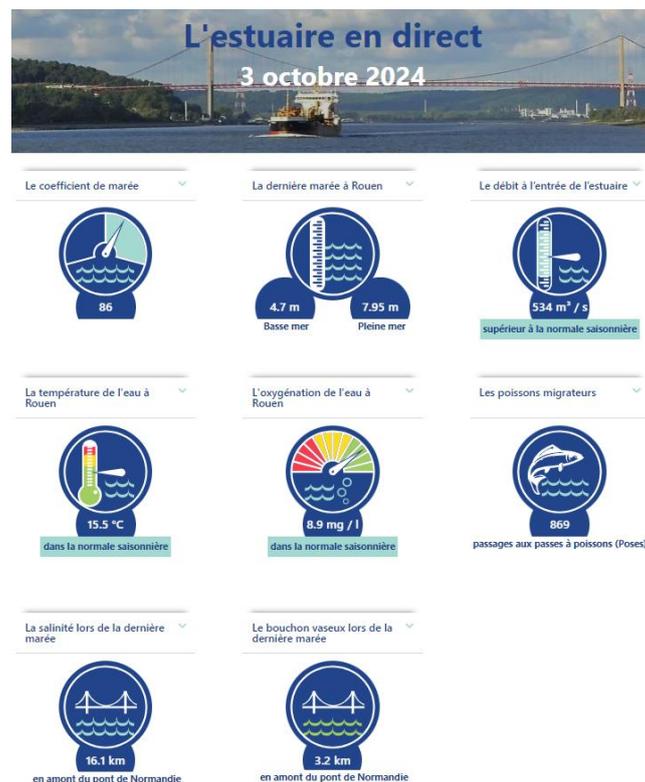


Figure 22 : Indicateur de l'estuaire en direct.

Le SIAAP propose le même type de dispositif, rendant compte de la qualité de la Seine francilienne [Figure 23].

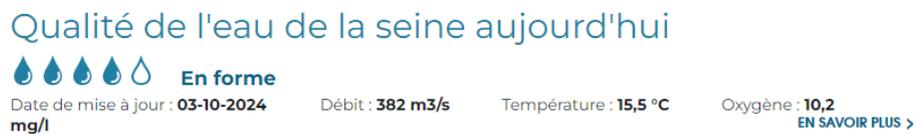


Figure 23 : Indicateurs de qualité de la Seine francilienne.

A RETENIR

La mise en place de l’observatoire “Axe Seine” (<https://www.phresques.fr/>) présente une description des différentes stations du méta-réseau PHRESQUES et un accès aux données. Il propose également une valorisation des données acquises, sous forme d’indicateurs (température, oxygène) déclinés à l’échelle saisonnière et montrant les évolutions spatiales et temporelles de ces derniers. Les données acquises font également l’objet de valorisations en direct, sous forme d’indicateurs de qualité de la Seine.

Plus d’information : GIP Seine Aval

2. Interprétation des mesures à haute fréquence à l'embouchure (bouée SCENES)

a. Objectifs et données disponibles

La station SCENES, située à l’embouchure de la Seine, a été déployée en octobre 2017. Depuis sa mise en eau, plusieurs années de données ont pu être acquises. Malgré plusieurs interruptions dans les mesures (*e.g.* station de surface détruite en janvier 2019) ou la télétransmission [Figure 24], les données acquises permettent notamment de caractériser la dynamique des matières en suspension, en surface et au fond, à l’embouchure de l’estuaire (Verney *et al.*, 2024a ; Verney *et al.*, 2024b). Cette analyse des données a été enrichie par le projet RUNTIME qui vise à décrire l’impact des événements extrêmes sur la variabilité spatiale et temporelle des MES en estuaire (Poppeschi *et al.*, 2024).

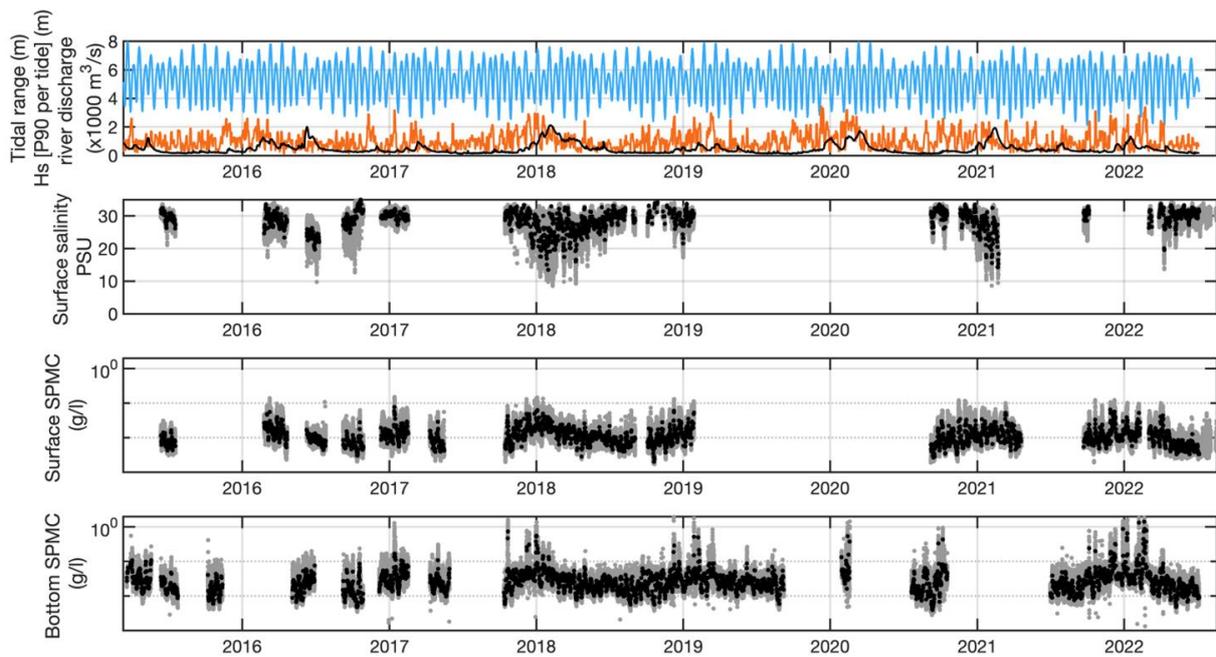


Figure 24 : Variabilité des forçages hydro-météorologiques, de la salinité de surface et des concentrations en MES en surface et au fond à la station SCENES sur la période 2015-2022. Les points gris correspondent à la haute fréquence, les points noirs illustrent les données médianes par marée (Verney et al., 2024b).

L'analyse des séries temporelles enregistrées permet d'étudier la relation entre les forçages (marées, vagues et débits de la Seine) et la dynamique des matières en suspension, avec un regard particulier sur les événements extrêmes [Figure 24]. Elle permet également d'estimer des flux sédimentaires. Cette analyse couvre des années hydrologiquement variées :

- années humides : 2018, 2020, 2021.
- années sèches : 2015, 2017, 2019, 2022.
- 2016 est une année atypique, avec une crue exceptionnelle en juin/juillet (plus de 2000m³/s).

b. Dynamiques des MES et influence des forçages

Globalement les concentrations des MES fluctuent autour de 10 mg/l en surface et atteignent ponctuellement près de 100 mg/l. Au fond, les concentrations sont plus importantes, entre 10 et 100 mg/l (pouvant dépasser 1000 mg/l ponctuellement) [Figure 24]. Au-delà des variations à l'échelle de la marée, 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 (période d'étiage et en absence de tempête).

Afin d'intercomparer les dynamiques des MES en fonction des différentes conditions de forçages, celles-ci sont séparées par classes de débit, marnage et hauteur significative de vague [Figure 25]. Cette comparaison met en avant une influence majeure de la marée et des vagues sur les concentrations en MES à l'embouchure, avec une influence plus faible du débit [Figure 25].

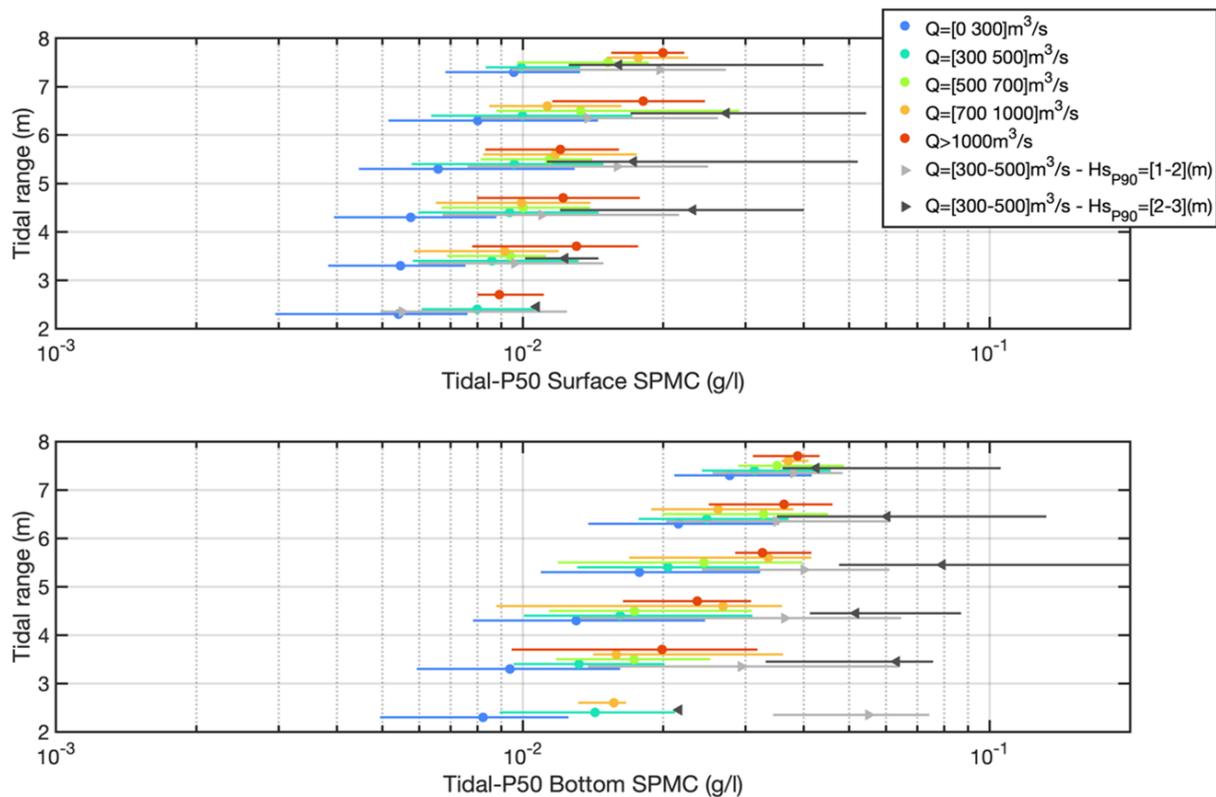


Figure 25 : Influence du marnage, du débit et des épisodes de vagues sur la concentration médiane par cycle de marée à la station SCENES. Les marqueurs indiquent les valeurs médianes par classes de conditions, et les lignes les percentiles 10 et 90 des distributions. Les ronds correspondent à des marées sans vagues ($Hs_{P90} < 1m$). Les conditions de vagues (triangles) ne sont illustrées que pour des débits moyens, i.e. compris entre 300 m³/s et 500 m³/s (Verney et al., 2024b).

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. L'effet des vagues quant à lui est plus important d'un facteur 2 à 3 sur les MES que le débit [Figure 25], mais reste saisonnier et plus ponctuel. De grandes quantités de sédiments sont remises en suspension localement à l'embouchure lors des tempêtes. La marée est un forçage fort et régulier de la dynamique sédimentaire dans le système de l'embouchure.

c. Estimation des flux sédimentaires au niveau de la bouée SCENES

Les travaux réalisés à partir des mesures effectuées à la bouée SCENES se sont également intéressés à l'estimation des flux sédimentaires instantanés et résiduels (i.e. le cumul des imports et des exports) au niveau de la station. Ces flux sont calculés à partir des mesures de turbidité optique et d'intensité acoustique des profileurs de courant (voir Verney et al., 2024a). Une méthodologie pour estimer les flux résiduels cumulés sur la période 2015-2022) est mise en place, pour compenser l'absence de série temporelle complète [Figure 24]. Elle se base sur le classement des valeurs de flux résiduels par condition de forçage. Les forçages étant connus sur l'ensemble de la période, cela permet d'attribuer des valeurs de flux sédimentaires dans les intervalles où il n'y a pas de mesure au niveau de la bouée SCENES. Pour chacune des conditions de forçage observées, une valeur est sélectionnée au hasard (parmi les mesures observées dans ces conditions), créant ainsi une courbe de flux cumulée. Cette méthode est renouvelée 300 fois, créant un ensemble de courbes de flux cumulés, dont la

moyenne est ensuite calculée pour obtenir une estimation des flux sur l'ensemble de la période d'étude.

Ces flux résiduels cumulés annuels sont intercomparés au regard des forçages rencontrés [Figure 26]. La Figure 26 révèle des tendances à l'export ou import de sédiments très variés. Les années dites humides, caractérisées par des débits moyens supérieurs à 500 m³/s, importent globalement des sédiments (~20 tonnes/m) et inversement pour les années sèches (entre -25 et -40 tonnes/m).

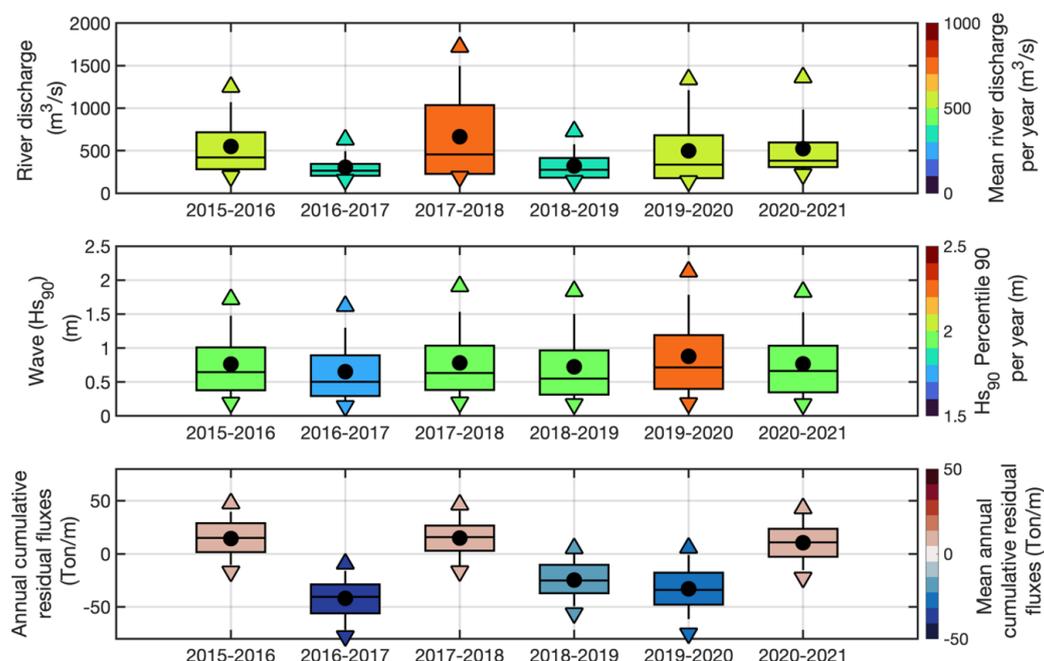


Figure 26 : Statistiques annuelles des distributions du débit, des vagues et des flux résiduels cumulés de 2015 à 2021. Les séparations annuelles se font sur critère hydrologique, i.e. autour des étiages de fin d'été : par exemple l'année 2015-2016 couvre la période octobre 2015 à septembre 2016 (Verney et al., 2024b).

En présence d'une forte décharge fluviale, la circulation barocline se renforce (i.e. ici courants de fond vers l'amont), ce qui permet l'import de sédiments vers l'estuaire. Les tempêtes renforcent l'export de sédiments vers la baie en remettant en suspension de grandes quantités de sédiments. Ce qui explique le bilan sédimentaire négatif de 2019-2020, particulièrement affecté par les vagues, même en présence de forts débits. L'étude de ces bilans sédimentaires estimés montre l'importance du pompage tidal, de la circulation barocline et des tempêtes.

d. Analyse des événements extrêmes

Un focus particulier a été mené sur les événements exceptionnels de tempête et de crue et leurs effets sur les MES à l'embouchure (Poppeschi et al., 2024). Dans un premier temps, une méthodologie est développée pour détecter ce type d'événements. Ils se caractérisent, pour les vagues et les débits, par le dépassement d'une valeur de seuil variable, calculée sur une marée et lissée sur 30 jours autour de la marée étudiée. Ce qui permet de mettre en avant des événements exceptionnels au

regard de la saison étudiée et non de l'année entière. 20 événements extrêmes de débit sont identifiés et 211 événements extrêmes de vagues sont détectés avec cette méthodologie [Figure 27].

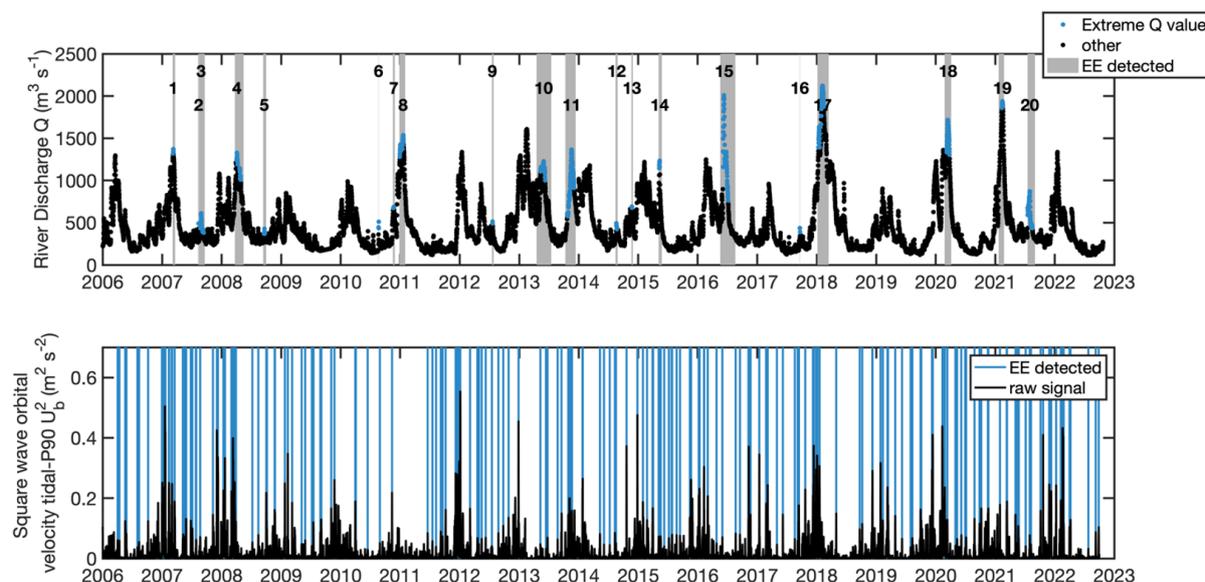


Figure 27 : Statistiques annuelles des distributions du débit, des vagues et des flux résiduels cumulés de 2015 à 2021. Les séparations annuelles se font sur critère hydrologique, i.e. autour des étiages de fin d'été : l'année 2015-2016 couvre ainsi pour exemple la période octobre 2015 à septembre 2016 (Verney et al., 2024b).

Une fois détectés, il est alors possible d'analyser l'effet de ces événements extrêmes sur la dynamique des MES, notamment en étudiant les anomalies de concentration en MES¹ au fond par mois. Ainsi, en relatif, les événements extrêmes sont plus impactants (x4) en avril/mai qu'en hiver (x2) par rapport à la climatologie mensuelle sur les concentrations de sédiment en suspension (i.e. par rapport au percentile 90 du mois). Néanmoins les quantités remobilisées sont nettement plus importantes en hiver.

Cette méthodologie est réutilisée afin d'analyser l'évolution de la fréquence des événements extrêmes de débits à l'embouchure de l'estuaire de Seine, de 1962 à 2021. Cette fois-ci, le seuil est calculé par période de 20 ans : 1962-1981, 1982-2001, et 2002-2021. 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 ; et toutes les classes d'intensité sont en augmentation. Toutefois, cette augmentation n'est pas linéaire : la période 1982-2001 enregistre 51 événements contre 40 pour la période 2002-2021. De plus, cette analyse met également en avant un décalage des événements saisonniers, avec des événements printaniers de plus en plus tardifs et des événements plus fréquents à l'automne.

¹ Les anomalies sont calculées en retranchant au signal brut de référence la contribution dynamique de la marée (voir Verney et al., 2024a pour plus d'informations).

A RETENIR

L'analyse des mesures effectuées par la bouée SCENES s'est intéressée à l'influence des forçages (débit, marée, vagues) sur la dynamique des matières en suspension. Ce travail a consisté à trier les séries temporelles par classe de débit, marnage et hauteur significative de vague, ce qui a permis de mettre en avant une influence quantitative plus importante de ces deux derniers par rapport au débit. Les tempêtes, bien que ponctuelles, remettent de grandes quantités de sédiments en suspension, ce qui participe à l'export de sédiments. A l'inverse, les forts débits renforcent la circulation barocline à l'embouchure (due à la différence de densité entre eau douce et eau salée), ce qui participe à l'import de sédiment vers l'estuaire. Les bilans sédimentaires (import vs export) sont donc fortement influencés par le régime des tempêtes et les débits. En l'absence de tempête, les tendances sont plutôt à l'import de sédiment, du fait du pompage tidal. Les forts débits participent fortement à cette tendance et les années humides témoignent donc principalement de bilans sédimentaires positifs. A l'inverse, les années sèches ou les années humides marquées par des tempêtes très fréquentes et/ou très intenses présentent des bilans sédimentaires négatifs. Une nouvelle méthodologie de détection des événements extrêmes liés aux débits et aux tempêtes a été mise en place. Elle a permis de mettre en avant une augmentation du nombre de ces épisodes tempétueux ou de crues par rapport au climat saisonnier entre 1962-1981 et 2002-2021. Elle révèle également un décalage des événements saisonniers, avec des événements printaniers de plus en plus tardifs et des événements plus fréquents à l'automne.

Plus d'information : Verney et al., 2024b – IFREMER

3. Bilan de 10 ans de mesure du réseau SYNAPSES

Les premières stations de mesures SYNAPSES, pour de "SYstème de surveillaNce Automatisée de la PhySico-chimie en Estuaire de Seine", sont mises en place en 2011. En 2021, à l'occasion des 10 ans du réseau de mesure à haute fréquence (soit plus de 35 millions de mesures), une analyse globale des paramètres surveillés est réalisée (GIP Seine-Aval, 2023). Elle se concentre sur l'évolution : des paramètres hydrométéorologiques, de la salinité, de la conductivité, de la température, des MES et de l'oxygène.

a. Front de salinité

L'analyse de la salinité est effectuée à partir de trois stations Balise A, Fatouville et Tancarville, situées dans la zone du gradient de salinité. Les valeurs fluctuent principalement avec la marée, mais également avec les périodes de crue et d'étiage. Les concentrations les plus fortes étant observées à marée haute, à toutes les stations, pendant les périodes d'étiage et de marée de vives eaux et les plus faibles pendant les crues avec des marées de mortes eaux [Figure 28].

Sur la période 2016 - 2022, la salinité moyenne augmente à l'embouchure, avec +1 PSU (PSU : Practical Salt Unit) dans le secteur de Tancarville, pour les mesures de fond, et +0.5 PSU pour les mesures de surface. L'augmentation est globalement plus prononcée proche du fond. La position moyenne du front de salinité, établie à 1 PSU, évolue également durant les 6 dernières années avec une remontée vers l'amont [Figure 28]. Des positions particulièrement amont sont notamment mises en évidence en 2022, avec une position moyenne au PK 220, du fait d'un étiage long et intense [Figure 28]. Ces remontées significatives du front de salinité sont importantes à suivre, car elles peuvent impacter un pompage d'eau industrielle situé à Norville (pk 316). La compréhension de ces remontées permettra de mieux les anticiper et ainsi aider l'industriel dans la gestion de son activité.

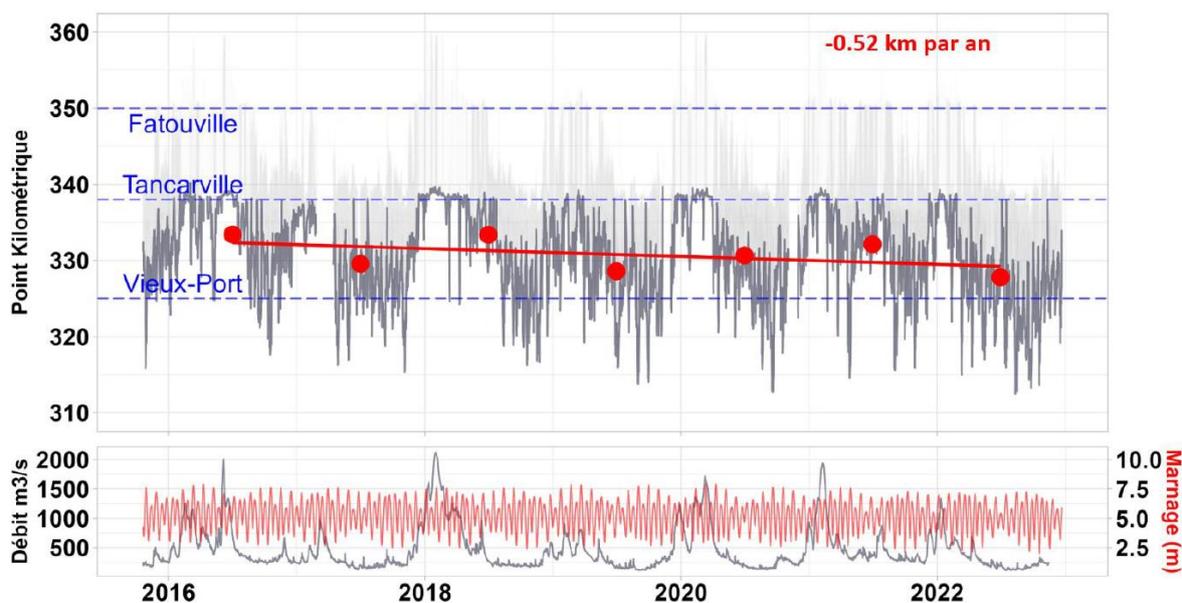


Figure 28 : Position la plus amont du front de salinité à 1 PSU au cours du temps. La position instantanée à haute fréquence du front de salinité est également représentée en gris clair (GIP Seine-Aval, 2023).

b. Bouchon vaseux et MES

Sur la période 2016-2022, une évolution des concentrations en MES est observée à l’embouchure de la Seine, avec une diminution d’une centaine de mg/l à Balise A et une augmentation d’une centaine de mg/l à Tancarville, sur la période 2015-2022. Cette évolution est liée à un déplacement vers l’amont de la position moyenne du bouchon vaseux (zone de turbidité maximum) d’environ 1,5 km sur cette même période [Figure 29]. Les résultats montrent que le bouchon vaseux migre vers l’amont lorsque le débit diminue et que les marées sont les moins intenses. La position du bouchon vaseux évolue entre Tancarville et l’embouchure et n’atteint ces extrêmes qu’en conditions exceptionnelles.

Dans la partie amont de l’estuaire, les variations de MES sont principalement liées au débit de la Seine. En période de crue, les concentrations médianes hebdomadaires peuvent dépasser les 100 mg/l. A l’inverse en période d’étiage la concentration est inférieure à 25 mg/l.

c. Température de l’eau

En estuaire de Seine, la température se caractérise par un gradient amont-aval. En période estivale, les températures les plus fortes sont observées à l’amont, avec jusqu’à 2 °C de plus qu’à l’aval. Durant l’hiver, ce gradient s’inverse, avec des températures plus faibles de 1,5 °C qu’à l’embouchure. Sur la période étudiée (2012-2022), un réchauffement des eaux est observé, avec une hausse de la température moyenne à Oissel de 0,54 °C [Figure 29].

d. Oxygénation de l’eau

L’oxygénation de l’eau de l’estuaire présente un gradient amont-aval, avec des valeurs moyennes plus fortes à l’amont (+0.5 à +2 mg/l selon les années), bien que les fluctuations soient

importantes. Un gradient est aussi observé entre le fond et la surface aux stations aval disposant de mesures au fond et en surface (Tancarville, Fatouville, environ 19 mg/l). Sur la période étudiée, les teneurs en oxygène des valeurs les plus faibles augmentent, avec +1,2 mg/l à Val des Leux et +0,6 mg/l à Rouen. A l'aval, la tendance s'inverse, avec une légère diminution des concentrations les plus faibles en surface et au fond (Balise A, Fatouville, Tancarville). Néanmoins, la diminution est beaucoup plus nette au fond, avec notamment -0.8 mg/l en moyenne sur la période 2014-2022 à Tancarville [Figure 29].

A RETENIR

Après 10 ans de mesures par le réseau SYNAPSES, une évolution des conditions physico-chimiques de l'estuaire est observée. L'avancée du bouchon vaseux et du front de salinité vers l'amont témoignent d'une « marinsation » de l'embouchure de l'estuaire (*i.e.* des conditions marines retrouvées plus en amont dans l'estuaire) [Figure 29]. La qualité de l'eau est également concernée par ces évolutions, avec des risques accrus de désoxygénation liés à l'augmentation de la température et une moindre capacité de dilution des rejets polluants lors des périodes de faible débit.

L'évolution du positionnement du bouchon vaseux et du gradient de salinité, la hausse des températures de l'eau sont autant de paramètres qui peuvent modifier les caractéristiques des habitats naturels et les capacités d'accueil pour la faune et la flore estuarienne. Ces résultats témoignent de l'intérêt de poursuivre et consolider le méta-réseau PHRESQUES, afin de mieux comprendre ces gradients de Paris à la mer et l'évolution des paramètres physico-chimiques le long du continuum.

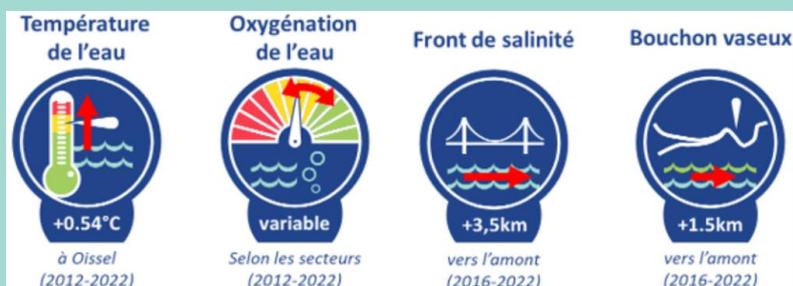


Figure 29 : Résumé des principales évolutions observées via le réseau SYNAPSES, sur une période de 10 ans (GIP Seine-Aval, 2023).

Plus d'information : GIP Seine-Aval, 2023 – GIP Seine Aval

4. L'observatoire Meseine

Le SIAAP s'appuie sur les données haute-fréquence acquises par le réseau MeSeine pour produire des bilans à différents pas de temps, notamment des [bulletins hebdomadaires](#) rendant compte du niveau d'oxygénation [Figure 30].

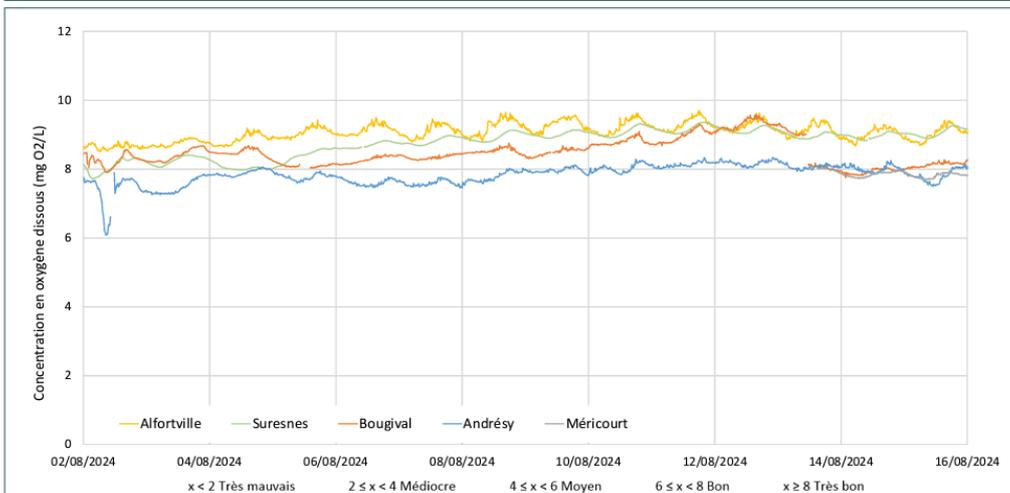
BULLETIN D'OXYGÉNATION DU MILIEU NATUREL

EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN OXYGÈNE DISSOUS EN SEINE



Date : 16 août 2024

Situation hydrologique de la Seine à 7h : Débit à Paris Austerlitz (source Vigicrues) : 286 m³/s / Température (Bougival) : 23,9 °C



Observations :

La communication avec la station de Méricourt a repris le 13/08. Une baisse de l'oxygène dissous a été observée le 02/08 à Andrézy suite à un épisode pluvieux.

L'ensemble des stations de mesure enregistrent, à ce jour, une oxygénation supérieure à 7 mg O₂/L.

A cause du débit de la Seine trop important (> 300 m³/s), les stations de mesure flottantes de Colombes, Sartrouville et Meulan n'ont pas été réinstallées.

Figure 30 : Bulletin d'oxygénation de la Seine francilienne (SIAAP).

AXE 4 - ANIMATION DU RESEAU D'ACTEURS

L'animation du réseau d'acteurs intervenant dans le cadre des suivis haute-fréquence le long du continuum de l'axe Seine est centrale dans la démarche PHRESQUES. Sur la base d'échanges méthodologiques, d'accès facilité à la donnée produite, d'analyses croisées des résultats et de leur divulgation, cette animation donne une cohérence au méta-réseau PHRESQUES. Lors de la phase 2 du projet, elle s'est traduite par de nombreux échanges et des réunions régulières d'un comité technique. Sous l'égide du GIP Seine-Aval, ce dernier regroupe les scientifiques intervenant dans le cadre du projet, ainsi que le SIAAP. Il a pour mission de suivre l'avancée des actions, faciliter leur croisement et faire vivre le méta-réseau.

Dans le cadre de cet axe, un séminaire a été organisé le 03 avril 2019. En présence du préfet, délégué interministériel au développement de la vallée de la Seine, il a réuni une cinquantaine de personnes pour partager le bilan de la phase 1 du projet et se tourner vers les actions de la phase 2 [Figure 31]. Un séminaire de restitution de la phase 2 est en cours de programmation au 1er semestre 2025.

<p>1. Le projet PHRESQUES Présentation du projet, phase 1 et 2 : Contexte/objectif et intérêt de la mesure haute fréquence pour la recherche scientifique <i>(JP. Lemoine – GIP Seine-Aval)</i></p> <p>2. Harmoniser Une nécessité pour le calcul des flux sédimentaires <i>(R. Verney – Ifremer)</i> Une nécessité pour l'estimation du métabolisme du fleuve <i>(P. Claquin – BOREA-CREC)</i></p> <p>3. Renforcer La station Poses <i>(JM. Mouchel – Sorbonne University / OSU Ecce-Terra)</i> La station SCENES et la future station estuaire : présentation du système et premiers résultats <i>(R. Verney – Ifremer)</i></p> <p>4. Innover Les mesures acoustiques pour l'estimation des flux sédimentaires en continu <i>(J. Deloffre – Université de Rouen et R. Verney – Ifremer)</i> La mesure automatique des sels nutritifs : avantages et inconvénients <i>(P. Claquin – BOREA-CREC)</i> Zoom sur le réseau MESEINE: Un réseau pour dynamiser l'innovation et construire l'outil de gestion de demain <i>(V. Rocher et S. Azimi – SIAAP)</i></p> <p>5. Valoriser Présentation de l'Observatoire de l'estuaire de la Seine : des indicateurs pour valoriser les données hautes fréquences vers le public <i>(C. Fisson – GIP Seine-Aval)</i></p>	
--	---

Figure 31 : Programme du séminaire PHRESQUES du 3 avril 2019.

A RETENIR

L'animation de la démarche PHRESQUES s'appuie sur des échanges scientifiques et techniques des différents partenaires. Un premier séminaire d'échanges s'est tenu en avril 2019 et un second est en cours de programmation au premier semestre 2025.

Plus d'information : GIP Seine Aval

PERSPECTIVES

Au terme de la phase 2 du projet PHRESQUES, plusieurs perspectives émergent :

1. **Le maintien et la pérennisation des réseaux** existants pour s'assurer de la continuité de l'acquisition des données et de leur disponibilité. La complémentarité des stations et l'harmonisation des paramètres acquis restent un point central, avec une stratégie de suivi à long terme à l'échelle du continuum qui pourrait être amendée. Les longues séries temporelles sont en effet une des clefs pour mieux appréhender l'évolution future de l'hydrosystème de la Seine. L'implémentation de nouveaux capteurs qui ont été testés et validés en phase 2 (*i.e.* couplage optique/acoustique pour les MES, nitrates) renforcerait le méta-réseau, en donnant accès à une nouvelle information pour mieux comprendre les dynamiques hydro-sédimentaires et biogéochimiques le long du continuum. A noter que la maintenance et le remplacement futur des bouées SCENES et SMILE nécessiteront de trouver des financements, indispensables pour le maintien du réseau. A noter également, la mise en place d'une station pérenne à l'interface fleuve/estuaire programmée par le SIAAP pour 2025.
2. **L'analyse des données acquises** pour améliorer notre compréhension du fonctionnement du système et de son évolution. Plusieurs années de données sont désormais disponibles, de Paris à la mer. Leur analyse pourrait être approfondie, que ce soit pour mieux comprendre cet hydrosystème de Paris à la mer, ou pour dégager des tendances d'évolutions. La mise à jour et l'enrichissement de l'observatoire devraient également contribuer à cet objectif (*e.g.* indicateurs basés sur les nitrates ou la chlorophylle). Cette base de données pourrait être mise à profit pour étudier la répercussion d'évènements particuliers (*i.e.* étiages prolongés, orages, crues, tempêtes) sur tout ou une partie du continuum.
3. **L'animation du consortium** pour faire vivre et renforcer le méta-réseau. Les échanges techniques et scientifiques sont à poursuivre, notamment sur les aspects méthodologiques d'acquisition et sur l'interprétation des données. Ils doivent faciliter les échanges sur les actions menées par chacun des réseaux ou dans le cadre d'autres projets scientifiques. Une première action d'animation est en cours de programmation, avec l'organisation d'un séminaire de restitution au premier semestre 2025.

BIBLIOGRAPHIE

Claquin P., Deloor M., Chasselin L., Serre Fredj L., Attia K., 2024. Capteurs Optiques de Nitrates et Capteur de Productivité Primaire Par Fluorescence Variable. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 7, 60 p.

Dereux, J., 2021. Expertise juridique mise en place d'un ponton flottant sur le site de Fatouville. carno avocats. N/Réf. : 21/258 - GIP SEINE-AVAL/CONSULT°

Druine F., Lafite R., Deloffre J., Verney R., Lemoine J.P., 2016. Projet SUSPENSE – Rapport technique sur la variabilité des coefficients de calibration NTU/mg.l-1 du réseau SYNAPSES. Projet Seine-Aval 5, 27p.

GIP Seine-Aval, 2023. Suivi en continu de la qualité de l'eau de la Seine par SYNAPSES entre 2012 et 2022 : Quelles tendances d'évolutions ? Rapport d'étude, 53 pp.

Grasso F. (coord.), Le Hir P., Mengual B., Walther R., Verney R., 2021. Projet MORPHOSEINE « Modélisation de l'évolution morphosédimentaire de l'estuaire de la Seine », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6, 97 p.

Lemoine J.P., 2018. Projet PHRESQUES – Projet d'harmonisation et de renforcement du suivi haute-fréquence de la qualité de l'eau de la vallée de Seine. Projet Seine-Aval 6, 15p.

Levallois D., 2020. Diagnostic d'un appontement en béton armé en vue de son aménagement FATOUVILLE-GRESTAIN. Rapport de mission, ref: 2282RAP, 22p

Poppeschi, C., Verney, R., Charria, G., 2024. 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>

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>

Tackx M. (Coord.), 2024. Projet SARTRE : « Seine-Amont : Réseaux trophiques estuariens ». Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6, 111 p.

Verney R., Le Berre D., Poppeschi C., Grasso F., Charria G., 2024b. Dynamique des sédiments en suspension à l'embouchure : analyse des données SCENES. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 7, 32 p.

Verney, R., Le Berre, D., Repecaud, M., Bocher, A., Bescond, T., Poppeschi, C., Grasso, F., 2024a. 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 to 2022 in situ high-frequency observations. Marine Geology. 471, 107261. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2024.107281>

Verney R., Tran D., Jacquet M., 2024c. Innovation : couplage des méthodes optiques et acoustiques. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 7, 25 p.

Xuereb, B., Fisson, C., Geffard, A. (coord.), Amara, R., Auffret, M., Bado-Nilles, A., Bon-nard, M., Bonnevalle-Normand, M., Chaumot, A., Costil, K., Geffard, O., Le Foll, F., Palos-Ladeiro, M., 2023. Projet BIOSURVEILLANCE : Proposition d'un pilote basé sur l'utilisation de biomarqueurs pour un appui à la surveillance de la qualité des masses d'eau du district Seine-Normandie. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6 et de la Zone Atelier Seine, 49p.



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

GIP Seine-Aval, 2024. PHRESQUES : synthèse de la phase 2 - Projet d'harmonisation et de renforcement du suivi haute-fréquence de la qualité de l'eau de la vallée de Seine. 45 p.

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

