



***Suivi en continu de la qualité de l'eau  
de la Seine par SYNAPSES  
entre 2012 et 2022 :  
Quelles tendances d'évolutions ?***

**Septembre 2023**



**GIP Seine-Aval**  
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC



# *Suivi en continu de la qualité de l'eau de la Seine par SYNAPSES\* entre 2012 et 2022 : Quelles tendances d'évolutions ?*

**Auteurs** : Alexandre Duval<sup>1</sup>, Cédric Fisson<sup>1</sup>, Jean Philippe Lemoine<sup>1</sup>

**Relecteurs** : Nicolas Bacq<sup>1</sup>, Pascal Claquin<sup>2</sup>, Albert Gallicher Lavanne<sup>3</sup>,  
Romaric Verney<sup>4</sup>

<sup>1</sup> GIP Seine-Aval

<sup>2</sup> Université de Caen Normandie

<sup>3</sup> HAROPA Port

<sup>4</sup> Ifremer

**\*La mise en œuvre du réseau SYNAPSES est réalisée dans le cadre d'un partenariat entre le GIP Seine-Aval et HAROPA Port (DT Rouen).**



## Résumé

Depuis 2011, la qualité de l'eau de l'estuaire de la Seine est suivie par le Réseau [SYNAPSES](#), acronyme de "SYstème de surveillaNce Automatisée de la Physico-chimie en Estuaire de Seine". La mise en œuvre de ce réseau est réalisée dans le cadre d'un partenariat entre le GIP Seine-Aval et HAROPA Port (DT Rouen). Il s'appuie sur des mesures réalisées toutes les 5 minutes sur différentes stations. L'analyse du jeu de données disponibles a permis de caractériser les fluctuations des différents paramètres mesurés tels que la température, l'oxygène dissous, la conductivité, la salinité et la turbidité. Dans le cadre du présent rapport, près de 35 millions de mesures ont ainsi été analysées afin d'évaluer les évolutions du fonctionnement de l'estuaire. Ces observations ont été synthétisées à travers des indicateurs qui permettent de mettre en évidence et de quantifier les évolutions des paramètres suivis et leurs relations avec les évolutions des forçages observées depuis la mise en place du réseau.



Figure 1 : Réseau de suivi haute fréquence SYNAPSES (nouvelles stations en bleu).

Les analyses sur les différents paramètres mesurés par SYNAPSES mettent en évidence les variations pluriannuelles, saisonnières et journalières en réponse aux forçages de l'estuaire que sont le débit et la marée. Comme d'autres estuaires, l'estuaire de la Seine présente plusieurs gradients : i/ un gradient de température s'inversant selon la saison (températures plus élevées à l'amont en été, et plus élevées à l'aval en hiver), ii/ un gradient d'oxygénation (concentrations plus élevées en remontant vers l'amont), iii/ un gradient de salinité et iv/ de turbidité (bouchon vaseux) dans sa partie aval (Balise A, Fatouville, Tancarville).

Les évolutions sur la période 2012-2022 révèlent une augmentation de la température de l'eau, particulièrement marquée sur la période estivale. Les niveaux d'oxygénation de l'estuaire augmentent à Rouen et Val-des-Leux, mais diminuent légèrement dans la partie aval, se rapprochant du seuil sensible pour les organismes aquatiques (5 mg/là au fond de la colonne d'eau à Tancarville). Dans ce même secteur, la dynamique de la salinité évolue également avec une augmentation progressive au fil des années, associée au déplacement du front de salinité de quelques kilomètres vers l'amont de l'estuaire en lien avec la diminution des débits observés sur la période considérée. L'analyse des données de turbidité met en avant une augmentation progressive des concentrations en MES à Tancarville ainsi qu'une diminution au niveau de Balise A. Cette évolution traduit une remontée vers l'amont du bouchon vaseux dans l'estuaire (moins marquée que pour la salinité).

En parallèle, les données disponibles de débit, de niveaux d'eau, de vagues et de température atmosphérique ont également été analysées pour caractériser le contexte hydrodynamique et climatique de l'estuaire de la Seine sur ces dernières décennies. L'analyse de ces forçages met principalement en avant une diminution du débit moyen de la Seine et une augmentation du niveau marin sur la période 1990-2022. La température atmosphérique est également décrite dans le secteur de Rouen depuis 2012 et est en augmentation.

Dans l'ensemble, il est remarquable d'observer que les évolutions mesurées sont cohérentes avec le contexte plus global de changement climatique, notamment avec l'évolution des forçages hydrologiques et climatiques. Ces constats soulignent l'intérêt de la mise en place d'un réseau de mesure haute fréquence sur un estuaire, tel que le réseau SYNAPSES en Seine. Ces 10 premières années de mesure font déjà ressortir une évolution des différents paramètres mesurés, avec notamment plusieurs points de vigilance sur les débits, la température, l'oxygénation, la salinité et la dynamique des MES. La poursuite de l'acquisition de données par le réseau SYNAPSES permettra de consolider ces observations sur le plus long terme.

# Sommaire

## Table des matières

Résumé .....	2
Introduction .....	6
<b>I. Contexte hydrodynamique et climatique de l'estuaire de la Seine .....</b>	<b>9</b>
I.A. Évolution du débit à Vernon .....	9
I.B. Évolution de la hauteur d'eau .....	10
I.C. Évolution de la hauteur des vagues à l'embouchure .....	12
I.D. Évolution de la température atmosphérique à Rouen-Boos .....	13
<b>II. Caractérisation de la salinité à l'aval de l'estuaire .....</b>	<b>15</b>
II.A. Comparaison des mesures fonds et surfaces .....	15
II.B. Évolution de la position du front de salinité .....	16
<b>III. Caractérisation des matières en suspension et du bouchon vaseux à l'aval de l'estuaire .....</b>	<b>20</b>
III.A. comparaison des mesures fonds surfaces .....	21
III.B. Évolution de la position du bouchon vaseux .....	22
III.C. Concentration du bouchon vaseux .....	25
<b>IV. Caractérisation des matières en suspension à l'amont de l'estuaire .....</b>	<b>27</b>
IV.A. Comparaison inter-sites .....	27
<b>V. Caractérisation de la conductivité à l'amont de l'estuaire .....</b>	<b>29</b>
<b>VI. Caractérisation de la température de l'eau .....</b>	<b>31</b>
VI.A. Variations longitudinales .....	31
VI.B. Évolution des températures .....	32
<b>VII. Caractérisation des concentrations en oxygène dissous .....</b>	<b>35</b>
III.A. Variations longitudinales .....	36
III.B. Comparaison des mesures fonds surfaces .....	37
III.C. Évolution des désoxygénations .....	38
<b>Conclusion .....</b>	<b>41</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>43</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>52</b>

## Introduction

Le réseau de suivi haute fréquence SYNAPSES mesure depuis 2011 les principaux paramètres de la qualité de l'eau de l'estuaire de la Seine (Turbidité, Salinité, Conductivité, Oxygène dissous, Température, Fluorescence liée à la chlorophylle - fréquence d'acquisition 5 minutes). Ce réseau prend le relais de suivis haute-fréquence réalisés antérieurement dans le cadre du projet MAREL (Ifremer) et des suivis menés par le Service de Navigation de la Seine.

Les principaux objectifs du réseau SYNAPSES sont :

- la caractérisation du fonctionnement de l'estuaire de la Seine.
- le suivi de son évolution.
- le suivi de l'impact de perturbations environnementales ou anthropiques ponctuelles (crue, étiage, accidents industriels...).

Ce réseau fournit également des données pour des projets de recherche et des études spécifiques (e.g. [Serre-Fredj L. 2023](#)). Elles ont notamment été utilisées pour évaluer l'impact de phénomènes climatiques intenses tels que la crue de juin 2016 ([Fisson C., 2017](#)), ou encore l'impact d'accidents environnementaux tels que l'incendie de la station d'épuration Seine-Aval (Yvelines), en juillet 2019 ([Guerin S et al., 2019](#)). Enfin, il s'inscrit dans une volonté de suivre l'évolution de l'estuaire de la Seine sur le long terme.

En 2023, le réseau SYNAPSES se compose de six stations, dont trois situées dans la partie aval de l'estuaire (Balise A, Fatouville, Tancarville) et 3 autres dans la partie amont (Vatteville-la-Rue, Val-des-Leux, Rouen). Pour les stations de Fatouville et Tancarville, positionnées dans le secteur de battement du bouchon vaseux, deux points de mesures simultanées sont disponibles, l'un à la surface (1 mètre sous la surface), et l'autre au fond de la colonne d'eau (1 mètre au-dessus du fond). La station de Vatteville-la-Rue a été mise en place en août 2022 en réponse à un besoin de suivi plus précis de suivre les périodes d'étiages intenses et n'est pas intégrée dans les analyses de ce rapport. Une station était initialement présente à Heurteauville, mais en raison d'un contexte sédimentaire particulier compromettant la représentativité des mesures, ce site n'est plus maintenu depuis 2016.

La couverture temporelle des données et les paramètres mesurés varient en fonction de la station, les données les plus anciennes ayant été mesurées à Tancarville en juin 2011 ([Tableau 1](#)). En complément du réseau SYNAPSES, des données de température mesurées au marégraphe de Oissel (HAROPA PORT-Rouen) et à la station Météo-France Rouen-Boos ont été intégrés dans les analyses ([cf. I.D.](#)), ainsi que les débits de la Seine à Vernon ([cf. I.A.](#)), les hauteurs significatives des vagues à l'embouchure ([cf. I.C.](#)), les marées théoriques au Havre et les hauteurs d'eau au niveau des stations SYNAPSES ([cf. I.B.](#)). L'analyse de ces données permet de replacer la période étudiée au sein des évolutions plus globales du contexte hydro-climatique de l'estuaire.

**Tableau 1 : Disponibilité des données pour chaque station et paramètre.**

Stations	Profondeur	Paramètre	Début de la période d'étude	Fin de la période d'étude
Balise A (pk 365)	1 m au-dessus du fond	Turbidité (NTU)	04/12/2014	/
		Oxygène dissous (mg/l)	04/12/2014	/
		Température (°C)	13/10/2015	/
		Conductivité (µS/cm)	04/12/2014	/
		Salinité (PSU)	13/10/2015	/
Fatouville surface (pk 350)	1 m sous la surface	Chlorophylle (µg/l)	01/06/2014	/
		Turbidité (NTU)	20/05/2014	/
		Oxygène dissous (mg/l)	20/05/2014	/
		Conductivité (µS/cm)	20/05/2014	/
		Salinité (PSU)	16/10/2015	/
Fatouville fond (pk 350)	1 m au-dessus du fond	Chlorophylle (µg/l)	20/05/2014	/
		Turbidité (NTU)	08/04/2014	/
		Oxygène dissous (mg/l)	08/04/2014	/
		Température (°C)	19/01/2015	/
		Conductivité (µS/cm)	08/04/2014	/
Tancarville surface (pk 338)	1 m sous la surface	Salinité (PSU)	16/10/2015	/
		Chlorophylle (µg/l)	08/04/2014	/
		Turbidité (NTU)	12/07/2011	/
		Oxygène dissous (mg/l)	12/07/2011	/
		Conductivité (µS/cm)	01/06/2011	/
Tancarville fond (pk 338)	1 m au-dessus du fond	Salinité (PSU)	19/10/2015	/
		Chlorophylle (µg/l)	10/06/2015	/
		Turbidité (NTU)	14/02/2014	/
		Oxygène dissous (mg/l)	14/02/2014	/
		Température (°C)	19/10/2015	/
Vatteville-la-Rue (pk 315)	1 m sous la surface	Conductivité (µS/cm)	14/02/2014	/
		Salinité (PSU)	19/10/2015	/
		Turbidité (NTU)	08/08/2022	/
		Oxygène dissous (mg/l)	08/08/2022	/
		Température (°C)	08/08/2022	/
Val-des-Leux (pk 265)	1 m sous la surface	Conductivité (µS/cm)	08/08/2022	/
		Turbidité (NTU)	12/07/2011	/
		Oxygène dissous (mg/l)	12/07/2011	/
Heurteauville (pk 297)	1 m sous la surface	Conductivité (µS/cm)	12/07/2011	/
		Turbidité (NTU)	24/08/2011	06/06/2016
		Oxygène dissous (mg/l)	12/07/2011	18/04/2016
Rouen (pk 243)	1 m sous la surface	Conductivité (µS/cm)	24/08/2011	06/06/2016
		Turbidité (NTU)	01/02/2012	/
		Oxygène dissous (mg/l)	01/02/2012	/
		Température (°C)	23/02/2018	/
		Conductivité (µS/cm)	01/02/2012	/
Oïssel (pk 229)	1 m sous la surface	Chlorophylle (µg/l)	01/02/2012	07/10/2021
		Température (°C)	01/01/2012	14/11/2022

Le présent rapport a pour objectif de présenter l'analyse des 10 ans de données du réseau SYNAPSES (température, oxygène dissous, conductivité, salinité, turbidité) pour caractériser la variabilité multi-échelle des différents paramètres. Les différentes tendances mises en avant dans ce document sont réalisées sur les années hydrologiques, qui, en lien avec la cyclicité et la saisonnalité des conditions hydrologiques, sont définies du 1er octobre de l'année N-1, au 30 septembre de l'année N (cf. I.A., figure 2). Malgré la période de mesure limitée, notamment au regard de la cyclicité des différents phénomènes climatiques, des trajectoires d'évolutions semblent se dessiner. Ces tendances restent cependant à considérer avec précautions.

**à noter :**

*En fonction des stations et des paramètres, certaines séries temporelles ne commencent pas avant les années 2014-2016. Par ailleurs, des changements de sondes ont eu lieu pour chacune des stations, qui étaient équipées de sondes YSI-6600, remplacées par des sondes YSI-EXO2 entre 2018 et 2021. Selon les paramètres, les mesures sont soumises à différents aléas techniques, susceptibles d'impacter la qualité des mesures.*

*Les mesures de fluorescence réalisées durant les premières années du réseau SYNAPSES présentent un important niveau d'incertitudes, elles nécessitent une évaluation plus approfondie et n'ont pas été analysées dans le cadre de la présente étude.*

*Les mesures amont étant réalisées sous la surface et les mesures à Balise A au fond, il n'est pas possible de comparer toutes les stations à la même profondeur. Les analyses sont à mettre en regard du gradient vertical fond-surface lorsque ce dernier peut être évalué.*

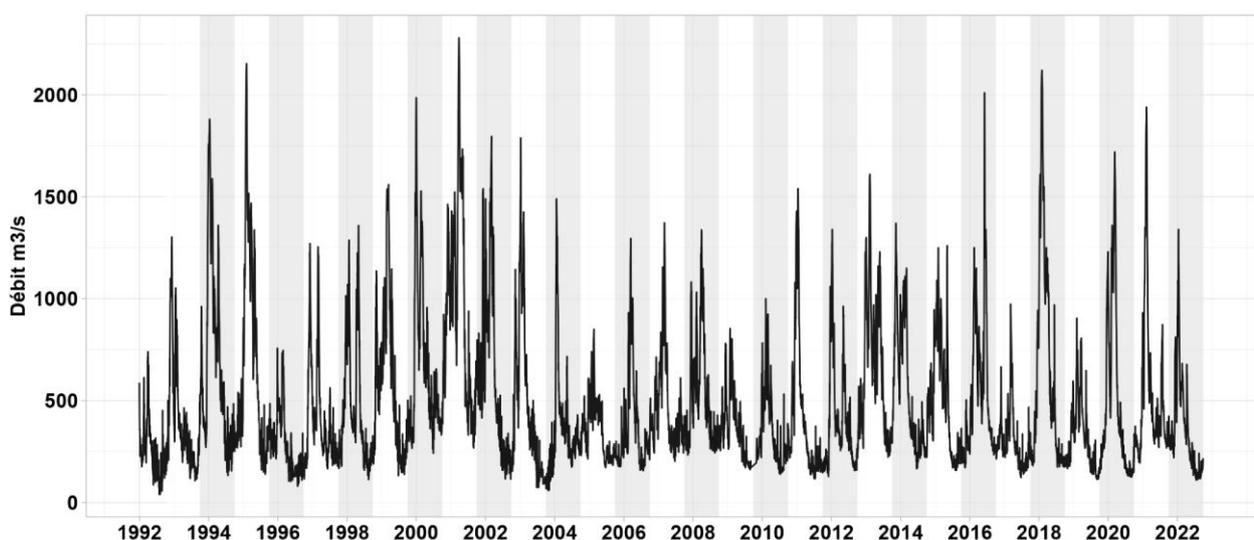
*Les données mesurées sont stockées dans une base de données "[SYNAPSES](#)". Afin d'identifier les données aberrantes, les mesures sont validées automatiquement et quotidiennement par un algorithme de validation, attribuant un code de qualité aux données ; et une validation manuelle est régulièrement effectuée. La présente étude s'appuie sur les données validées automatiquement et manuellement.*

# I. Contexte hydrodynamique et climatique de l'estuaire de la Seine

Les variations des paramètres mesurés par le réseau SYNAPSES sont liées à l'interaction entre les différents forçages de l'estuaire de la Seine (*i.e.* débit, marée, hauteur des vagues, température). L'objectif de ce chapitre est d'analyser ces derniers pour s'y référer comme éléments d'interprétation.

## I.A. Évolution du débit à Vernon

Les mesures de débit de la Seine sont issues de la plateforme HydroPortail et correspondent au débit moyen journalier mesuré à Vernon (pk 150), à l'amont de l'estuaire de la Seine. Cette station est principalement influencée par le barrage de navigation de Port-Mort à Gaillon (rôle de seuil) et par les grands lacs de Seine situés sur l'Yonne, la Marne, l'Aube, et la Seine ([Seine Grands Lacs, 2023](#)). La construction des grands lacs de Seine s'étalant entre 1949 et le début des années 1990, le choix d'analyser une série temporelle débutant en 1992 a été fait pour caractériser l'évolution du débit avec des aménagements comparables ([Figure 2](#)).



**Figure 2 : Débit moyen journalier à Vernon en m<sup>3</sup>/s depuis 1992. Les bandes grises et blanches correspondent à la délimitation des années hydrologiques (du 01 octobre au 30 septembre).**

Le débit de la Seine alterne entre des périodes de crue et des périodes d'étiage. La période de crue correspond au moment de l'année où le débit est le plus fort (jusqu'à plus de 2000 m<sup>3</sup>/s). Les pics de débit les plus élevés sont presque toujours atteints en hiver, à la suite d'épisodes pluvieux importants (à noter une crue atypique en juin 2016, avec des valeurs de débit jamais mesurées au printemps). À l'inverse, la période d'étiage correspond au moment de l'année où le débit de la Seine est au plus faible (125 m<sup>3</sup>/s en 2022) de la fin de l'été jusqu'à octobre-novembre. Ce régime hydrologique est lié au climat "pluvial océanique" du bassin versant de la Seine, dont la pluviométrie est plus élevée en hiver et plus faible en été ([Lemoine J.P. & Verney R., 2015](#)).

Depuis le début des années 1990, le débit à Vernon diminue. Une régression tracée sur les médianes des années hydrologiques permet d'estimer une pente à -2 m<sup>3</sup>/s par an sur cette période ([Figure 3](#)). Cette diminution est également perceptible sur les extrêmes, à savoir les débits d'étiage (percentiles 5) et les débits de crue (percentiles 95). Les débits d'étiage présentent l'évolution la moins marquée, avec une pente à -0.11 m<sup>3</sup>/s par an (-1.34 m<sup>3</sup>/s pour les percentiles 25),

contrairement aux débits de crue dont la diminution est de  $-3.69 \text{ m}^3/\text{s}$  par an ( $-2.16 \text{ m}^3/\text{s}$  pour les percentiles 75). **Sur la période considérée, cela se traduit par une diminution de  $62 \text{ m}^3/\text{s}$  pour les débits médians ( $42$  à  $67 \text{ m}^3/\text{s}$  pour les percentiles 25 et 75), de  $115 \text{ m}^3/\text{s}$  pour les débits de crue et de  $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$  pour les débits d'étiages.** Le calcul de ces dépendances temporelles linéaires est forcé sur la base de données sous échantillonnées par années hydrologiques (hypothèse déterminante et discutable). Les  $r^2$  montrent qu'elles ne sont statistiquement pas robustes: elles sont données à titre indicatif et doivent être considérées avec précaution.

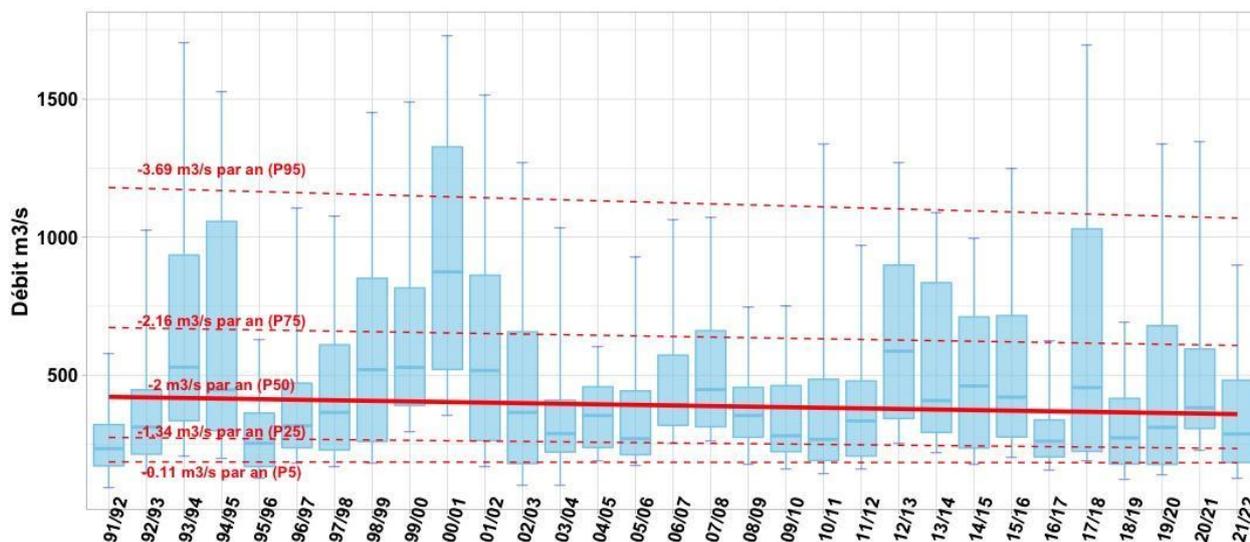


Figure 3 : Diagrammes en boîte des mesures du débit à Vernon ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), entre 1991 et 2022 (années hydrologiques octobre-octobre). Les boîtes à moustaches et les régressions linéaires sont tracées sur les percentiles 5 ( $R^2 = -0.03$ ), 25 ( $R^2 = -0.007$ ), 50 ( $R^2 = -0.01$ ), 75 ( $R^2 = -0.03$ ), 95 ( $R^2 = -0.02$ ).

## I.B. Évolution de la hauteur d'eau

Les données de hauteurs d'eau à Balise A, Tancarville, Fatouville, Val-des-Leux et Rouen (HAROPA Port, hauteurs exprimées en m CMH) des 30 à 40 dernières années ont été analysées pour mettre en avant leur évolution sur les années hydrologiques. La hauteur d'eau variant au gré des marées, cela implique que les plus faibles hauteurs (percentiles 5) correspondent aux plus bas niveaux atteints par les marées basses. Les hauteurs les plus importantes (percentiles 95), correspondent aux plus hauts niveaux atteints par les marées hautes (Figure 4).

Dans le secteur aval de l'estuaire (Balise A, Fatouville, Tancarville), les hauteurs d'eau varient entre 1.7 et 7.8 mètres à Balise A, entre 2 et 7.9 mètres à Fatouville, entre 2.3 et 8 mètres à Tancarville. Dans le secteur plus amont (Val-des-Leux, Rouen), les hauteurs d'eau varient entre 4.5 et 7.7 mètres à Val-des-Leux, entre 4.6 et 7.9 mètres à Rouen.

À l'embouchure (Balise A), une augmentation générale de la hauteur d'eau est observée, que ce soit pour la médiane annuelle avec une pente à  $+3.2 \text{ mm}$  par an, ou pour les hauteurs de pleines et basses mers (p75-95 / p25-5), avec des pentes à  $+4 \text{ mm}$  par an. **Sur la période 1984-2022, ces tendances expriment une augmentation du niveau marin comprise entre  $+12$  et  $+15 \text{ cm}$ , cohérente avec les observations faites sur le littoral français ([www.sonel.org](http://www.sonel.org)).**

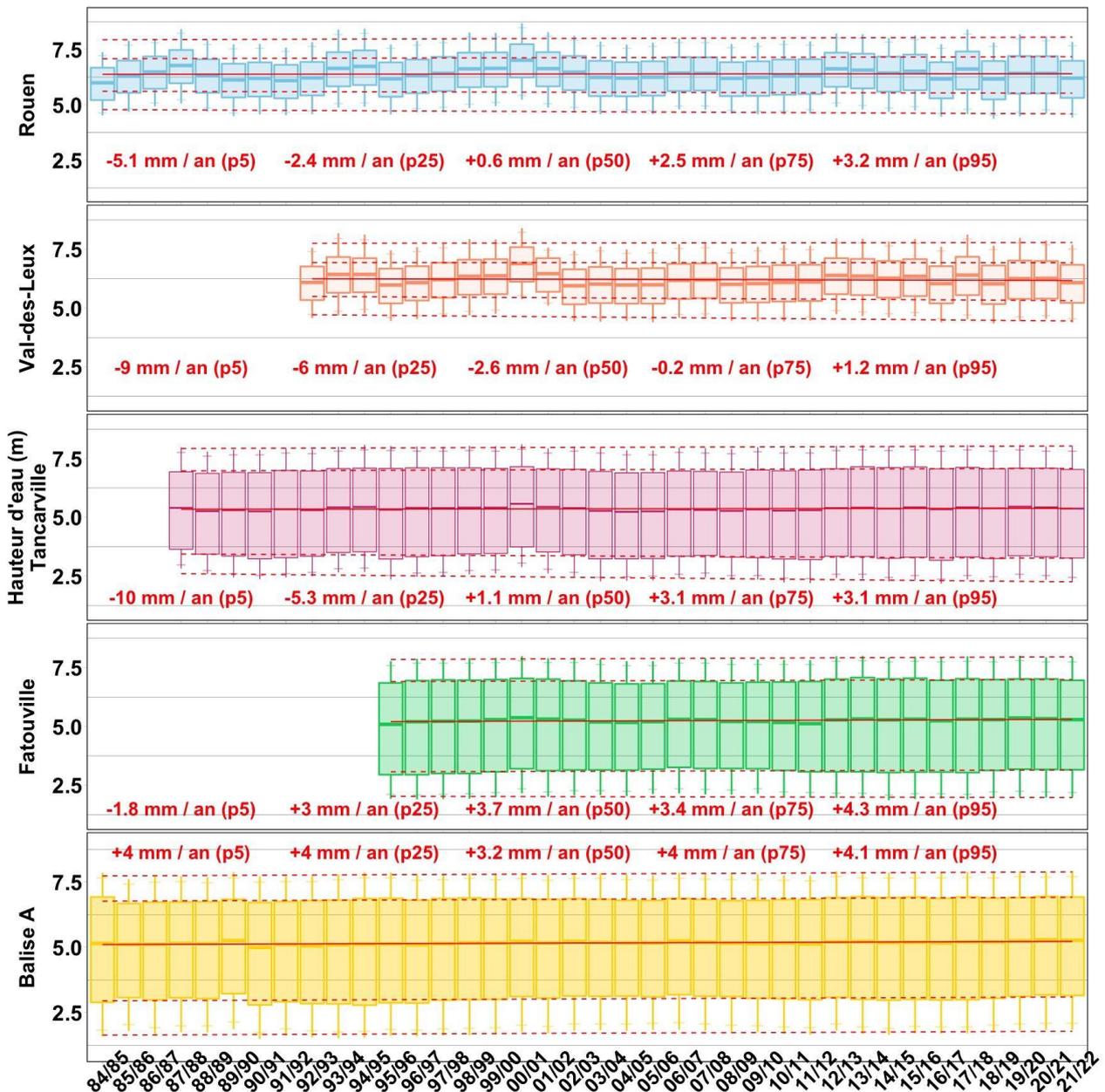


Figure 4 : Diagrammes en boîte des hauteurs d'eau à Balise A, Fatouville et Tancarville, Val-des-Leux, Rouen, selon les années hydrologiques (octobre-octobre). Les boîtes à moustaches et les régressions linéaires sont tracées sur les percentiles 5,25,50,75,95. Les statistiques sont présentées en annexes 9-13.

Dans le secteur Fatouville-Tancarville, les percentiles 25, 50, 75, 95 des hauteurs d'eau augmentent également, avec des tendances comprises entre +3 et +4.3 mm par an (à partir de 1995 pour Fatouville, et 1987 pour Tancarville). Contrairement à l'embouchure, la tendance s'inverse pour les plus bas niveaux d'eau, avec -1.8 mm par an à Fatouville (p5), contre -10 et -5.3 mm par an à Tancarville (p5, p25). Ces tendances se confirment à l'amont de l'estuaire, notamment à Rouen (à partir de 1984), où les plus hauts niveaux d'eau sont en augmentation (+2.5 et +3.2 mm par an) et les plus faibles niveaux d'eau sont en diminution (-5.1 et -2.4 mm par an). À Val-des-Leux, la hauteur d'eau est en diminution sur l'ensemble des statistiques (de -0.2 à -9 mm par an), à l'exception des plus hautes valeurs (p95), pour lesquelles la pente est à +1.2 mm par an.

L'augmentation de la hauteur d'eau est particulièrement marquée à l'embouchure. En remontant à l'amont de l'estuaire, la tendance est plus contrastée : les plus hauts niveaux d'eau augmentent de moins en moins et les plus bas niveaux diminuent de plus en plus. Cette évolution peut être mise au regard de l'augmentation du niveau marin et de l'évolution du débit de la Seine, dont la diminution peut impacter plus fortement l'amont de l'estuaire, notamment en période d'étiage. Néanmoins, ces

observations ne peuvent pas être attribuées uniquement aux évolutions des débits et du niveau marin, les évolutions morphologiques de l'estuaire, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle, impactent également l'hydrodynamisme et la propagation de la marée (Lemoine J.P., 2021).

## I.C. Évolution de la hauteur des vagues à l'embouchure

Les vagues présentes dans la proche baie de Seine font partie des forçages influençant directement le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire. À l'exception des houles provenant du large (Nord Ouest), ces dernières sont générées dans la baie de Seine par les vents locaux. Les données présentées correspondent aux valeurs de hauteur significative des vagues (moyenne des hauteurs du tiers des vagues les plus hautes) à l'embouchure de la Seine. Elles sont issues des simulations du modèle numérique de vagues Wave Watch III (projet Seine-Aval 6 ARES) (Figure 5).

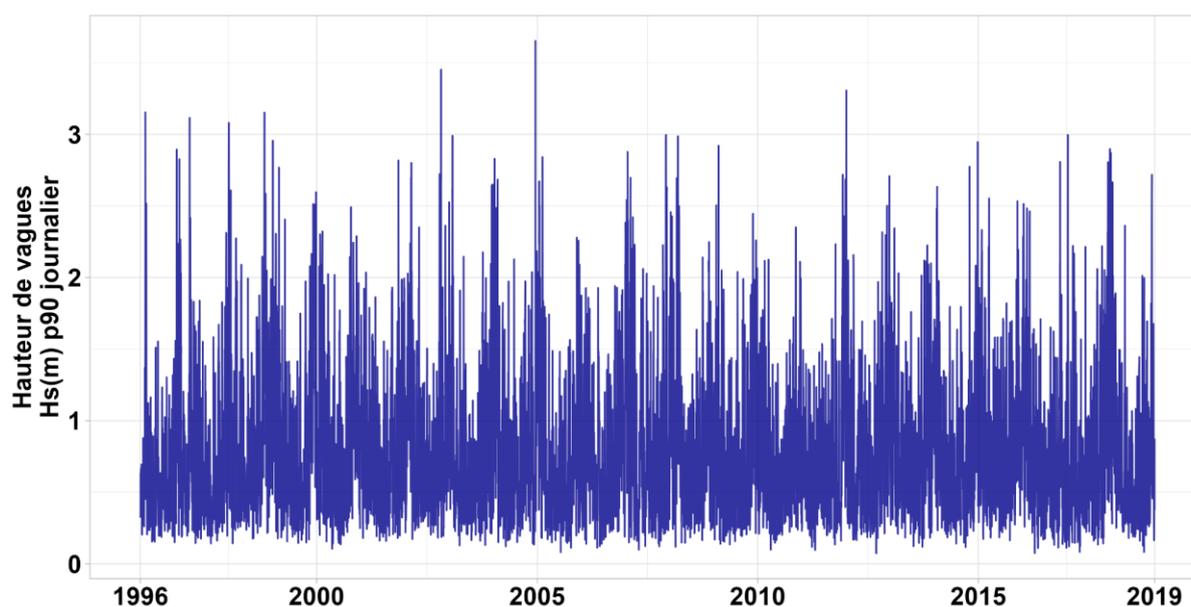


Figure 5 : Évolution de la hauteur des vagues à l'embouchure sur la période 1996-2018 (percentile 90 journalier).

Les données montrent une saisonnalité marquée. Les vagues les plus faibles sont observées en été, avec des vagues maximales journalières de 0.6 mètres en moyenne. En hiver, la période est la plus propice aux tempêtes susceptibles de générer des vagues importantes et ces dernières atteignent en moyenne, une hauteur maximale journalière de 1 mètre (jusqu'à 2-3 mètres pour les plus élevées).

Afin d'étudier l'évolution de la hauteur des vagues sur la période considérée, les régressions linéaires peuvent être tracées sur les différentes statistiques annuelles (Figure 6).

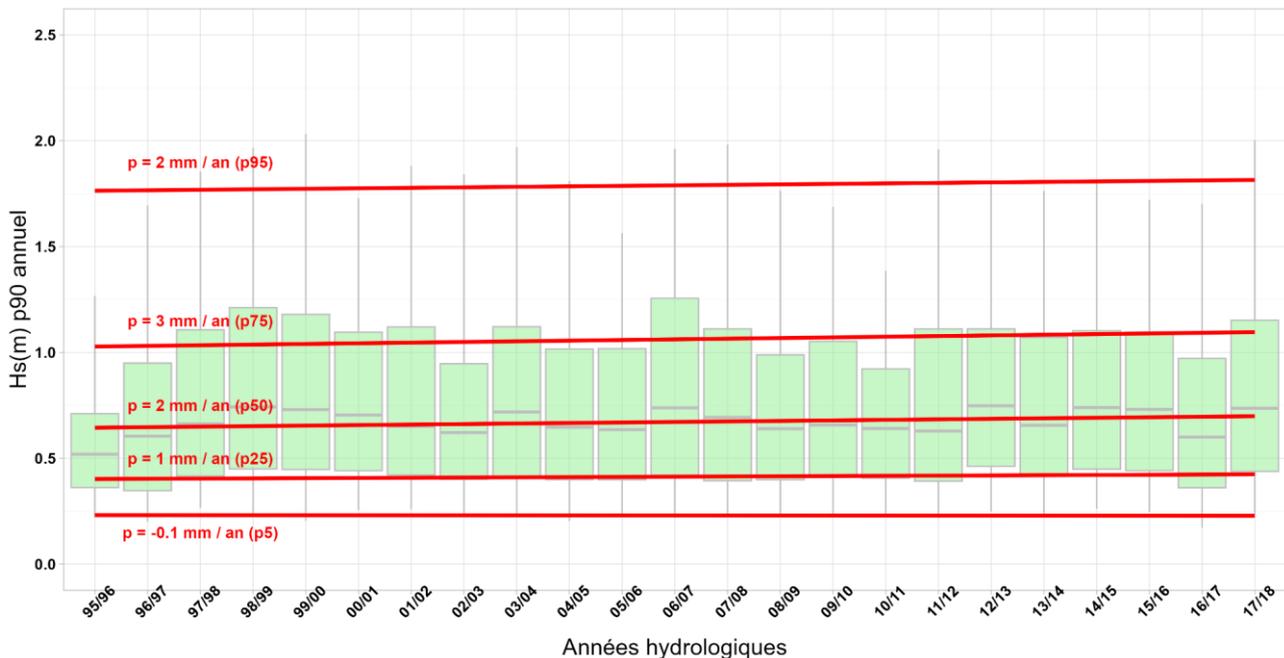


Figure 6 : Diagrammes en boîte de la hauteur des vagues (p90 journalier), selon les années hydrologiques (octobre-octobre). Les régressions linéaires sont tracées sur les différents compartiments des diagrammes en boîtes, à savoir les percentiles 5 ( $R^2 = -0.05$ ), 25 ( $R^2 = -0.05$ ), 50 ( $R^2 = 0.04$ ), 75 ( $R^2 = -0.01$ ), 95 ( $R^2 = -0.04$ ).

Hormis les valeurs extrêmes faibles (percentiles 5), pour lesquelles une diminution négligeable se dessine (-0.1 millimètre par an), la hauteur des vagues présente une augmentation sur la période considérée. Les “normales” (p25, p50, p75) et les extrêmes (p95), montrent une tendance similaire à la hausse : entre +1 à +3 millimètres par an. **Sur la période considérée, une augmentation totale de la hauteur des vagues de 20 à 70 millimètres est ainsi constatée sur la période de 1995 à 2018.** Cette tendance semble cependant très incertaine et liée à l’année très calme 95-96.

## I.D. Évolution de la température atmosphérique à Rouen-Boos

Les données de température de l’air sur la période 2012-2022<sup>1</sup> sont issues de la station Météo-France Rouen-Boos (Base de données SYNOP) (Figure 7).

Les températures médianes hebdomadaires varient entre 0°C pour les plus faibles valeurs atteintes en hiver et 22.5°C pour les plus hautes valeurs atteintes en été. Des régressions linéaires tracées sur les moyennes des années hydrologiques et sur les moyennes saisonales (été et hiver), permettent d’estimer l’évolution de la température à Rouen-Boos sur cette période.

**Entre 2012 et 2022, la température moyenne annuelle a augmenté au rythme de +0.11°C par an, soit +1.1°C au total. Les étés et les hivers montrent une évolution plus marquée, avec une augmentation totale de +1.7°C pour les étés et +1.3°C pour les hivers.**

<sup>1</sup> La température de l’air à Rouen-Boos (station météo de l’aéroport) n’est pas représentative des températures de l’ensemble du bassin versant de la Seine. Idéalement, il faudrait considérer les températures de l’ensemble des stations du bassin versant afin d’obtenir un indicateur de température plus robuste.

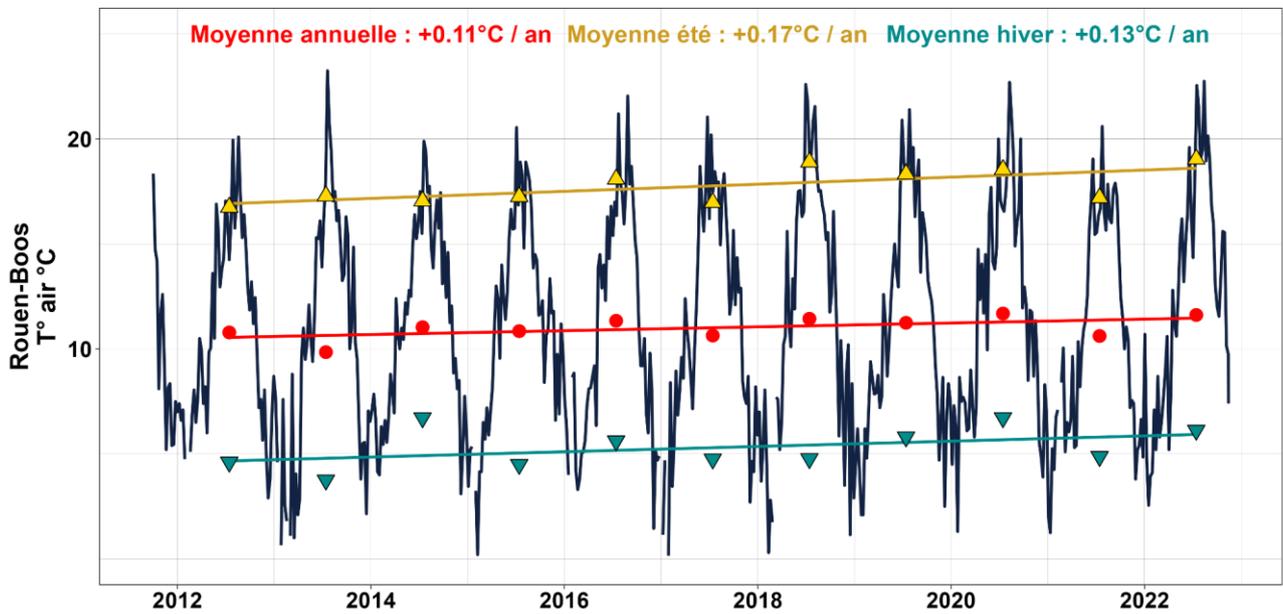


Figure 7 : Évolution de la température de l'air à la station Rouen-Boos (médiane / semaine, en °C). La droite de tendance en rouge est tracée sur les moyennes des années hydrologiques octobre-octobre ( $R^2 = 0.08$ ). La droite jaune est tracée sur les moyennes des étés ( $R^2 = 0.02$ ) et la droite bleue sur les moyennes des hivers ( $R^2 = 0.2$ ).

## II. Caractérisation de la salinité à l'aval de l'estuaire

À l'embouchure de la Seine, le mélange entre les eaux marines salées et les eaux douces du fleuve forme un gradient de salinité qui s'étend sur plusieurs kilomètres (Figure 8). La dynamique et la position de cette zone de mélange sont contrôlées par les forçages hydrodynamiques tels que les marées et le débit de la Seine. Elles varient à différentes échelles : de la marée semi-diurne aux échelles saisonnières et interannuelles, en passant par les périodes de vives-eaux/mortes-eaux. Sur une échelle temporelle plus grande, ces variations dépendent également des changements morphologiques de l'estuaire de la Seine et des évolutions climatiques (GIP Seine-Aval ; Lemoine J.P. & Verney R., 2015).

Les stations Balise A, Fatouville et Tancarville se situent dans l'emprise du gradient (séries temporelles en annexe 1) et leur salinité fluctue en fonction de sa position, au gré des marées (augmentation à marée montante via l'intrusion des eaux marines et diminution à marée descendante), mais également des saisons (débits de crue et d'étiage). En lien avec la position des stations, les mesures de salinité les plus faibles sont enregistrées à Tancarville (moyennes annuelles aux alentours de 4 PSU) et les plus élevées sont enregistrées à Balise A (moyennes annuelles aux alentours de 24.5 PSU) (Annexe 2).

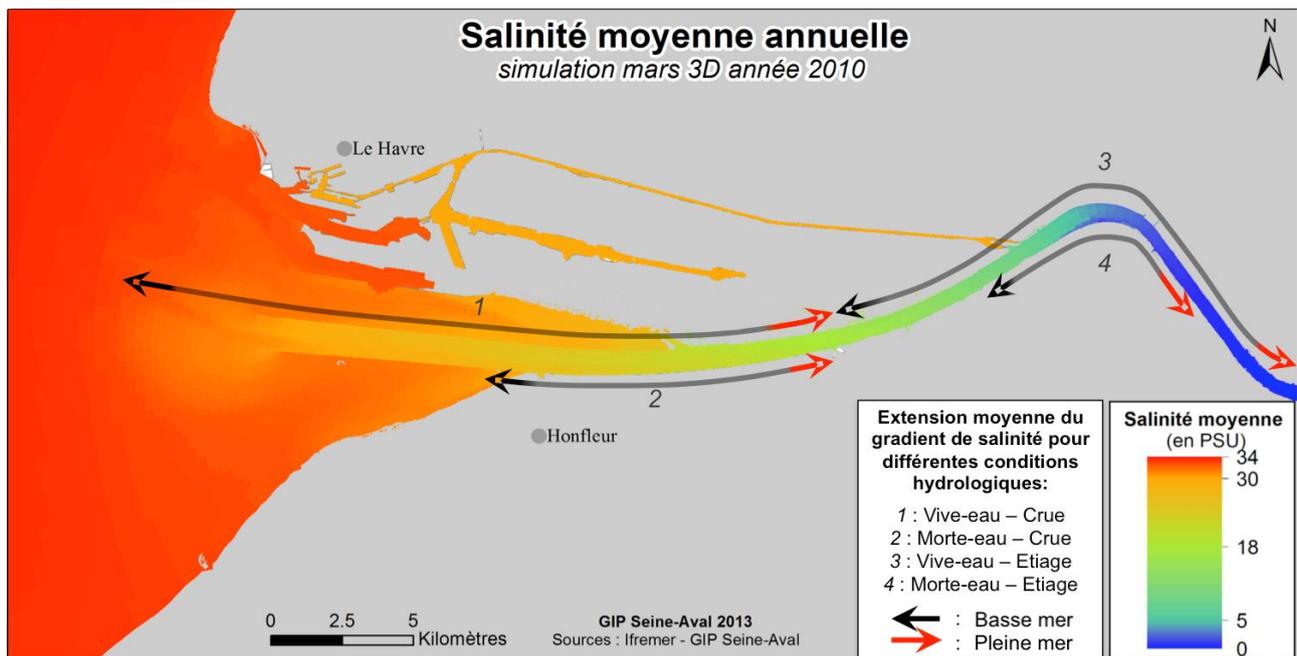


Figure 8 : Représentation des salinités moyennes à l'embouchure pour l'année 2010, simulation mars 3D (Lemoine J.P. & Verney R., 2015).

### II.A. Comparaison des mesures fonds et surfaces

Les mesures de fond et de surface de la salinité dans le secteur Fatouville-Tancarville peuvent être comparées (Figure 9). Les boîtes à moustaches montrent des salinités plus élevées dans la partie inférieure de la colonne d'eau.

L'analyse statistique des moyennes saisonnières (Tableau 2) indique que les différences les plus marquées sont à Fatouville, avec une salinité de fond en moyenne supérieure de 2 à 3 PSU par rapport à la surface. À Tancarville, les différences sont plus minimales et la salinité de fond est supérieure de 0.3 à 0.5 PSU.

L'origine de ces différences peut s'expliquer par la différence d'écoulement entre les eaux marines salées en profondeur, plus denses que les eaux fluviales en surface, créant un gradient vertical de salinité dans la colonne d'eau. Le gradient est cependant plus faible en hiver lorsque les conditions hydrodynamiques (principalement liées au débit) sont plus intenses, favorisant ainsi la turbulence et le mélange des eaux entre fond et surface (GIP Seine-Aval., 2013 ; Lemoine J.P., 2021).

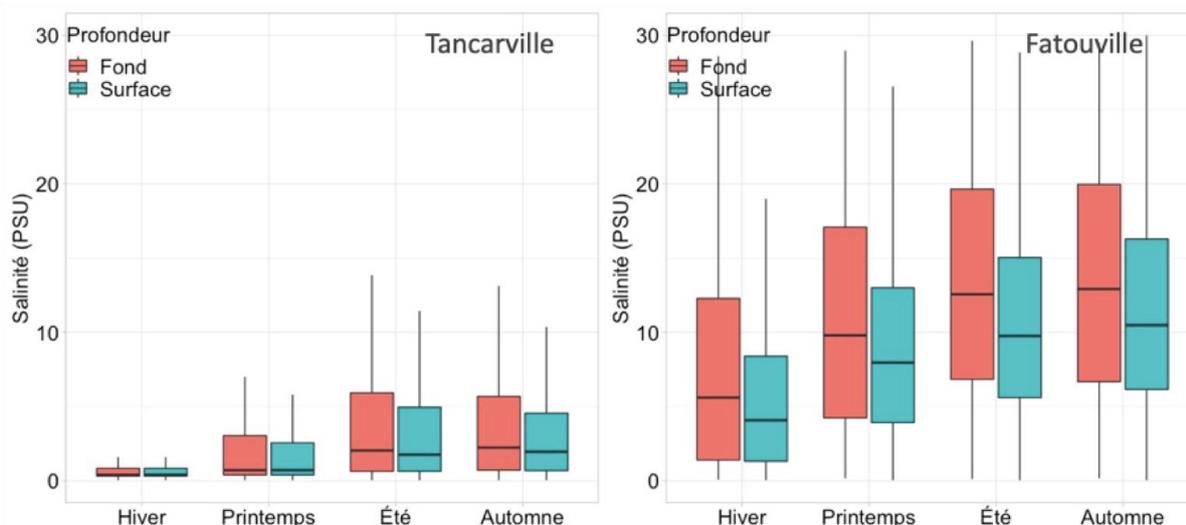


Figure 9 : Diagrammes en boîte des mesures de salinité PSU (toutes années comprises), pour les stations de fond et de surface à Tancarville et Fatouville.

Tableau 2 : Statistiques saisonnières (toutes années comprises) des mesures de salinité PSU (les P5 et P95 correspondent aux percentiles 5 et 95 calculés pour chacune des saisons).

Saisons	Fatouville fond			Fatouville surface			Tancarville fond			Tancarville surface		
	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95
Été	3,05	13,14	24,44	2,69	10,70	20,86	0,41	3,76	11,25	0,43	3,21	9,50
Hiver	0,54	7,57	19,22	0,41	5,64	15,04	0,27	1,10	4,19	0,27	0,98	3,28
Printemps	1,35	10,90	22,46	1,34	8,90	19,13	0,30	2,30	8,07	0,31	1,82	5,83
Automne	2,35	13,42	24,90	2,19	11,40	22,78	0,38	3,78	11,54	0,39	3,21	9,46

## II.B. Évolution de la position du front de salinité

Compte tenu de l'évolution des forçages de l'estuaire, notamment de la diminution des débits et l'augmentation du niveau marin à l'embouchure (cf. I.A-I.B.), il est possible de mettre en lien ces évolutions avec la position du front de salinité et tenter d'évaluer la dynamique de "marinisation" de l'estuaire de la Seine.

Le "front de salinité" correspond à une valeur fixe de salinité de 1 PSU, ici utilisée comme un indicateur de la position de la limite amont du gradient de salinité. Inspiré de l'étude de Grasso *et al.*, 2018, les mesures de salinité de Balise A, Fatouville et Tancarville, permettent de calculer sa position à haute fréquence.

Le principe de ce calcul consiste à rechercher la position du seuil de salinité de 1 PSU, en réalisant une interpolation basée sur les mesures des 3 stations. Par exemple, lorsque la salinité 1 PSU est présente entre Fatouville et Tancarville, sa position peut être extrapolée en un temps donné, en se basant sur les valeurs de salinité à Fatouville et Tancarville ainsi que sur la distance entre ces deux stations<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Cela suppose une relation linéaire entre le gradient et son emprise longitudinale : une diminution progressive et constante de la salinité, proportionnelle au nombre de kilomètres. Dans l'estuaire de la Seine, cette relation n'est pas exactement linéaire et cette méthode ne permet d'obtenir qu'une estimation de la position du front de salinité 1 PSU.

Ce calcul a été appliqué sur l'ensemble de la période couverte par les mesures de salinité (2016-2022). En sélectionnant la position la plus amont par marée (position atteinte au maximum de la marée montante), la dynamique du front de salinité peut être suivie depuis 2016 (Figure 10). De manière à suivre sa dynamique intra-annuelle, les résultats sont regroupés à l'échelle mensuelle (Figure 11).

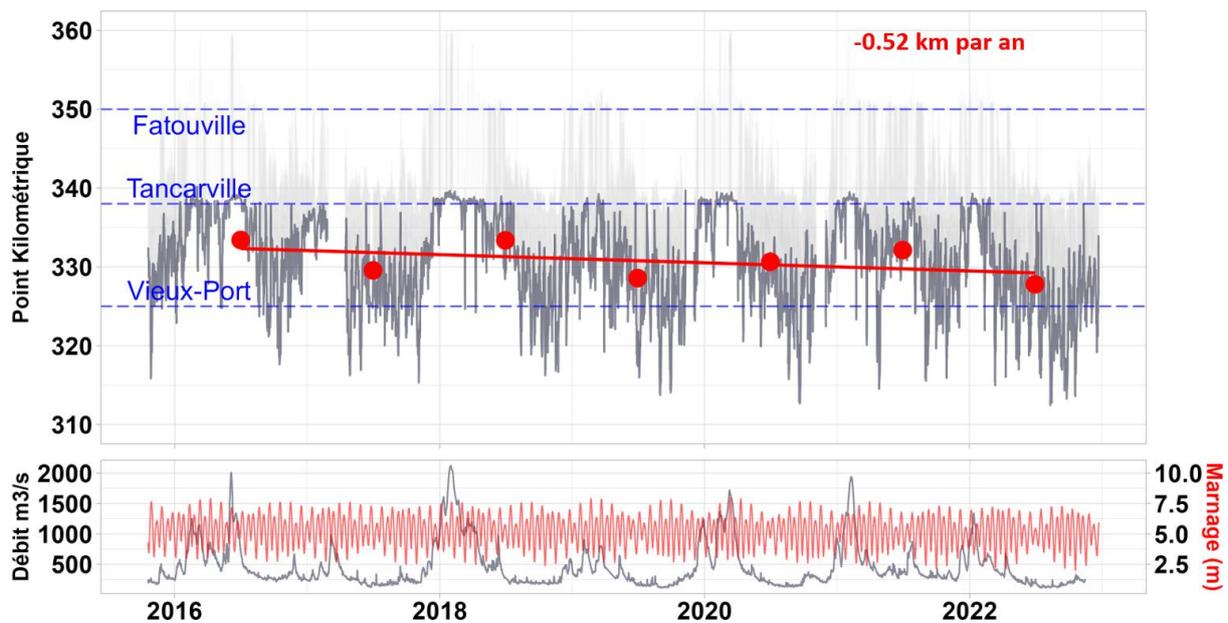


Figure 10 : Position la plus amont du front de salinité à 1 PSU au cours du temps, en Point Kilométrique, et droite de tendance tracée sur les moyennes des années hydrologiques (octobre-octobre, points rouges) ( $R^2 = 0.09$ ). La position instantanée à haute fréquence du front de salinité est également représentée en gris clair.

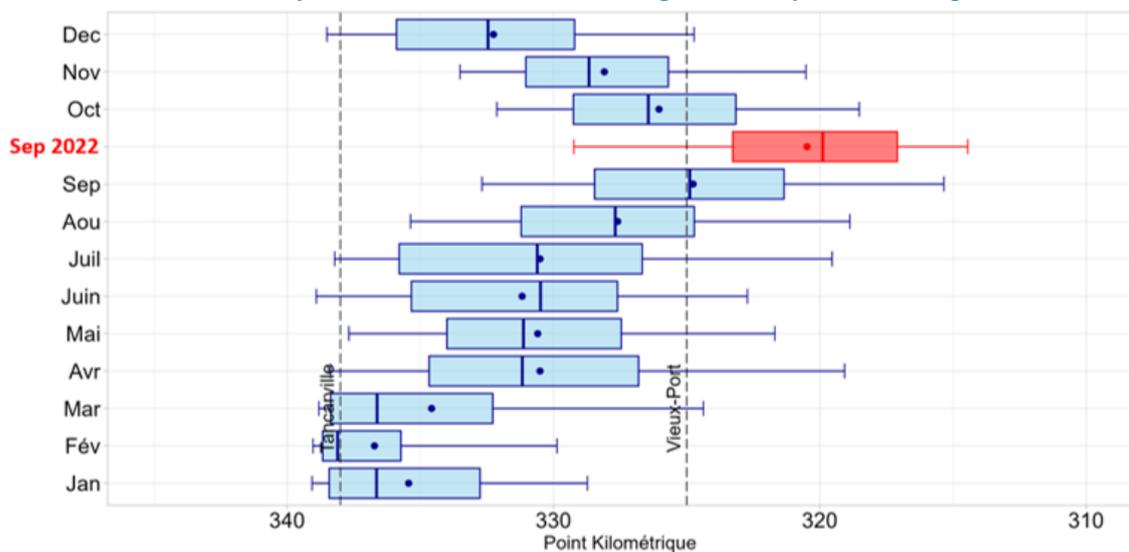
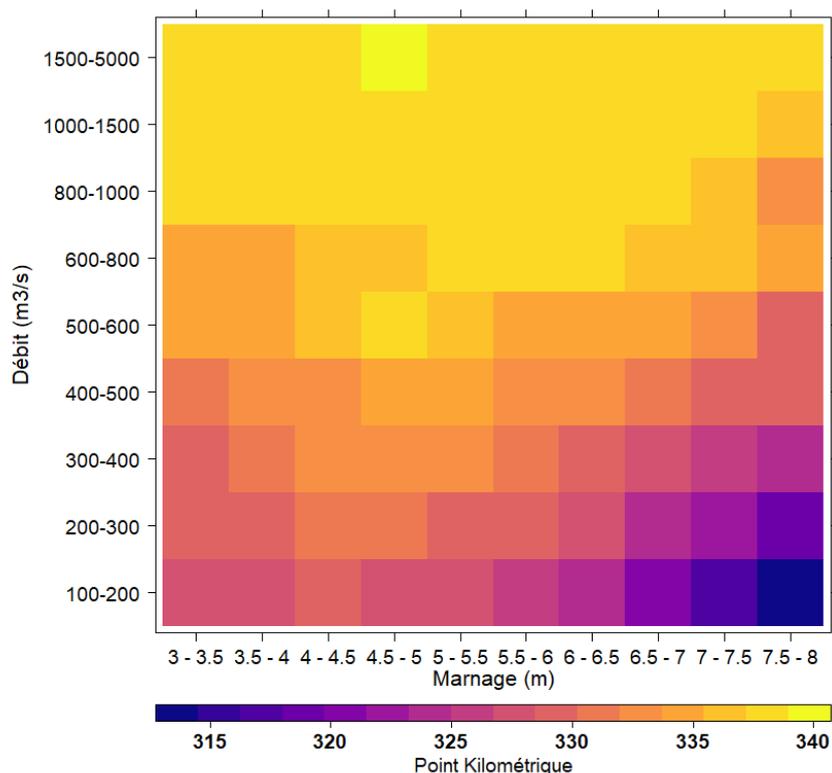


Figure 11 : Diagrammes en boîte de la position du front de salinité 1 PSU regroupée mensuellement (2016-2022). (les lignes verticales dans les boîtes représentent la médiane annuelle, les points représentent les moyennes et les extrémités correspondent aux percentiles 5 et 95).

La série temporelle obtenue sur ces 6 années montre que la position la plus aval du front de salinité (1 PSU) est généralement positionnée à Tancarville (pk 338) et que cette position est atteinte lors des périodes de crue (principalement en hiver, Figure 11 et 12). À l'inverse, le front de salinité peut se positionner jusqu'à 10 km plus à l'amont de Vieux-Port (pk 325), lors des remontées maximales dans l'estuaire, cette fois pendant les périodes d'étiage et de marées aux coefficients élevés (septembre-octobre, Figure 11). Les positions les plus amont ont été atteintes en septembre 2022, avec une pénétration maximale au pk 313 (Vatteville-la-Rue). Cette migration est particulièrement problématique pour les gestionnaires du pompage d'eau industriel de Norville qui ont dû adapter leur mode opératoire pour ne pas prélever d'eau saumâtre.

La [figure 12](#) permet de caractériser plus précisément les relations de la position du front de salinité avec le marnage et le débit.



**Figure 12 : Positionnement moyen du front de salinité selon différentes classes de débit à Vernon et de marnages au Havre (les nombres d'observations utilisés pour calculer les moyennes sont présentés en Annexe 3), sur les 6 dernières années.**

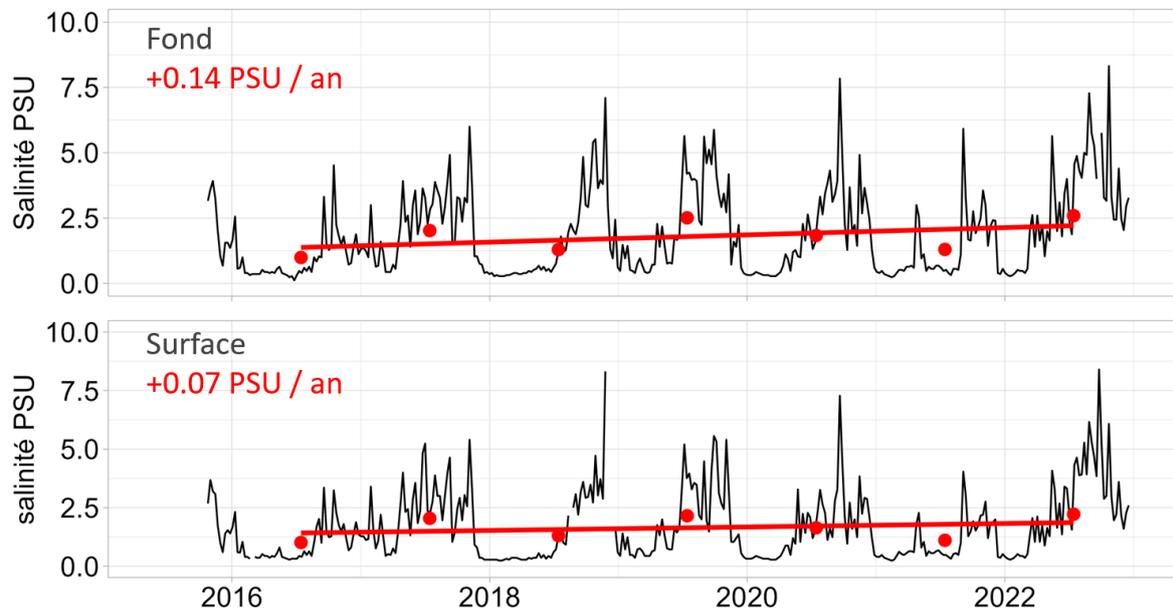
La position du front de salinité est plus à l'amont lorsque le débit diminue et que le marnage est élevé<sup>3</sup>. Sa position la plus amont est atteinte pour des marnages compris entre 7 et 8 mètres (marées de vives eaux) et des débits compris entre 100 et 300 m<sup>3</sup>/s (conditions d'étiages). Lorsque ces deux conditions sont réunies, la position moyenne du front de salinité (sur ces 7 années) se situe aux alentours du pk 315. Sa position est plus à l'aval avec l'augmentation du débit et un marnage faible, jusqu'à atteindre le pk 340, pour des débits supérieurs à 1500 m<sup>3</sup>/s.

**La régression tracée sur les moyennes des années hydrologiques permet de décrire une tendance sur la position du front de salinité 1 PSU pour la période concernée (Figure 10), avec une pente estimée à -0.5 km/an, soit une remontée vers l'amont de 0.5 km par an. Cela traduit une remontée totale de 3.5 km sur ces 7 années.**

Cette évolution peut également être constatée à une échelle locale, avec une augmentation progressive de la salinité à Tancarville, de l'ordre de +0.14 PSU par an au fond (+1 PSU au total) et de +0.07 PSU par an en surface (+0.5 PSU au total) (Figure 13).

**Ces évolutions sur la dynamique du gradient de salinité à l'aval de l'estuaire de la Seine résultent de la diminution des débits et dans une moindre mesure de l'augmentation du niveau marin.**

<sup>3</sup> A noter, les valeurs de marnages sont calculées sur les hauteurs d'eau théoriques au Havre (à pleine et basse mer) et le débit est mesuré à Vernon, bien en amont de l'estuaire et peut ne pas être entièrement représentatif du débit proche de l'embouchure.



**Figure 13 : Évolution des mesures de salinité (fond et surface) à Tancarville. Les droites de tendance sont tracées sur les moyennes des années hydrologiques octobre-octobre ( $R^2 = 0.07$  pour les mesures de fond), ( $R^2 = -0.08$  pour les mesures de surface).**

### III. Caractérisation des matières en suspension et du bouchon vaseux à l'aval de l'estuaire

Le bouchon vaseux correspond à la zone d'accumulation des particules en suspension (zone de turbidité maximale), formée par les processus hydro-sédimentaires à la rencontre entre les eaux douces du fleuve et les eaux marines introduites par la marée. Sa position et sa densité sont principalement contrôlées par la marée et le débit. Dans le secteur aval de l'estuaire de la Seine, sa présence influence fortement la dynamique des matières en suspension (MES).

Les mesures de turbidités réalisées dans le cadre du réseau SYNAPSES correspondent à une mesure de la transparence de l'eau. Ces mesures, exprimées en NTU (unité internationale de turbidité), sont effectuées par des turbidimètres<sup>4</sup> et peuvent être converties en concentration en matières en suspension.

Dans le cadre du projet SUSPENSE (Druine F. *et al.*, 2016 ; Druine F., 2018), des coefficients de calibration ont été calculés pour convertir les mesures de turbidité (effectuées par les sondes YSI 6600 équipées de capteurs optiques) en concentrations de MES (mg/l). Ce projet a permis d'obtenir un coefficient de calibration global NTU/[MES] applicable à chacune des stations du réseau SYNAPSES (coefficient global : [MES] (mg/l) = 1.21 NTU). L'ensemble des mesures de turbidité a été traité avec ce coefficient<sup>5</sup>.

Une fois l'ensemble de ces conversions appliquées, les séries temporelles des concentrations de MES sont obtenues sur les stations Balise A, Fatouville et Tancarville (Figure 14).

Les mesures illustrent l'influence du débit sur les concentrations en MES, mais également l'influence de la marée (Figure 15). Les plus fortes concentrations sont atteintes lors des périodes d'étiage avec des médianes hebdomadaires atteignant jusqu'à 1500 mg/l à Fatouville et Tancarville. À l'inverse, les plus faibles valeurs atteignent seulement 100 mg/l à Tancarville lors des périodes de crue. Pour la station Balise A, les concentrations sont plus faibles et les médianes hebdomadaires restent inférieures à 500 mg/l pour les plus élevées. Selon les années et les saisons, les concentrations à Balise A sont globalement 2 à 5 fois inférieures à celles des stations Fatouville et Tancarville (Annexe 4-5).

L'influence de la marée est visible à une échelle temporelle plus fine (Figure 15), avec une augmentation des concentrations via la remise en suspension des sédiments au flot et au jusant (courant des marées montantes et descendantes) ainsi qu'une diminution via décantation des matières en suspension lors des étales (Lemoine J.P. & Verney R., 2015). À une échelle temporelle plus grande, les MES dépendent également de l'alternance entre les périodes de vives-eaux et les périodes de mortes-eaux sur des cycles de 14 jours (marées d'équinoxe tous les 28 jours engendrant les vives-eaux les plus importantes) : plus l'amplitude des marées est importante, plus les particules sont remises en suspension par les courants forts et plus les concentrations sont élevées.

<sup>4</sup> Les turbidimètres du réseau SYNAPSES mesurent de 0 à 4000 NTU.

<sup>5</sup> Le coefficient n'est valable que pour les mesures de turbidité effectuées avec les sondes YSI 6600, or ces dernières ont été remplacées à partir de 2018-2019 par de nouvelles sondes YSI EXO2 (début 2022 pour les stations Rouen et Val-des-Leux). De manière à homogénéiser toutes les données de turbidité et pouvoir les convertir en concentrations de MES, l'ensemble des mesures réalisées par les sondes YSI EXO2 a été converti avec un coefficient de conversion 6600/EXO2, environ égal à 1.8 (1 NTU 6600 = 1.8 NTU EXO2, coefficient déterminé par une campagne de mesures simultanées des deux sondes).

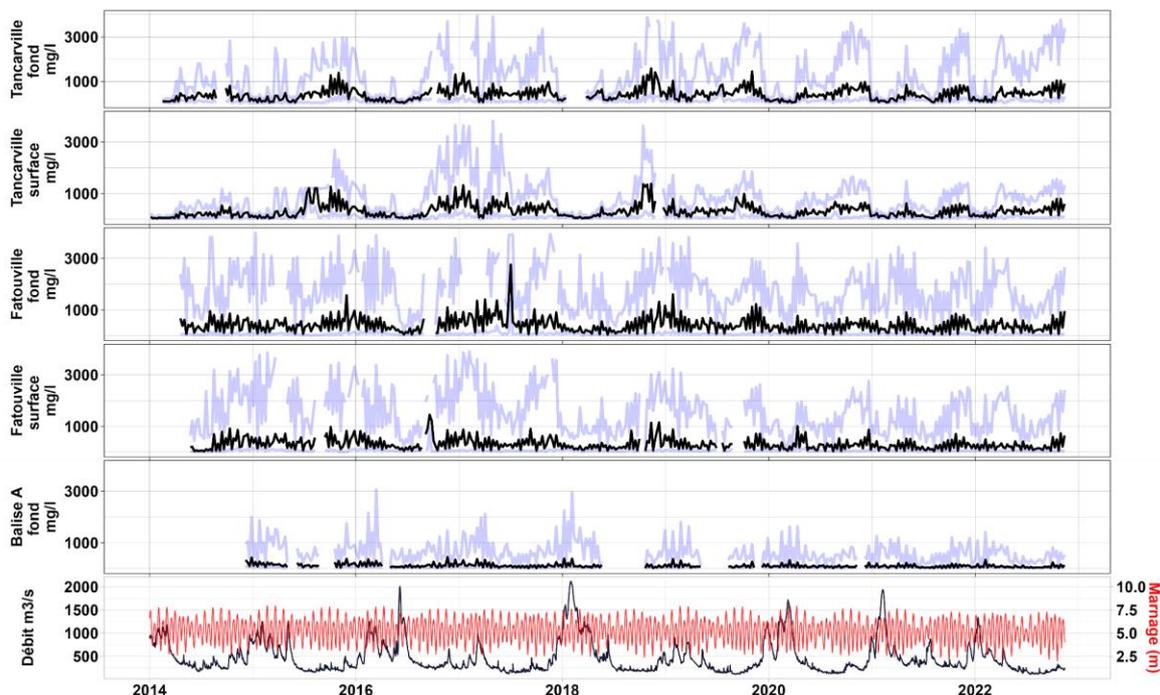


Figure 14 : Évolution des mesures de concentrations en MES (mg/l) (médianes / semaines), dans la partie aval de l'estuaire. Les enveloppes bleu clair représentent les percentiles 5 et 95 calculés par semaine. Les séries temporelles du débit à Vernon et du marnage au Havre sont également ajoutées.

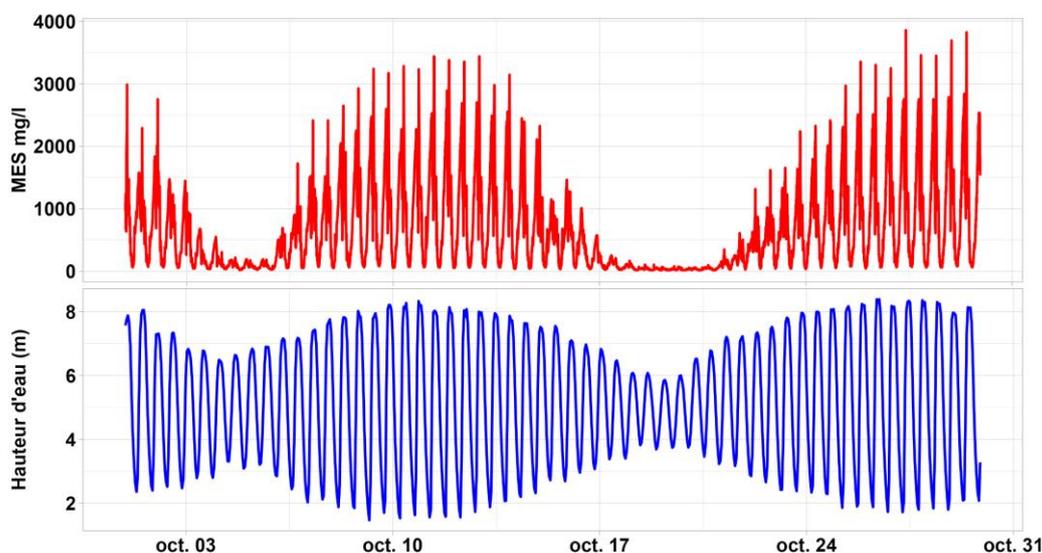


Figure 15 : Concentrations en MES (mg/l) au fond et hauteur d'eau à Fatouville en octobre 2022.

### III.A. comparaison des mesures fonds surfaces

Les concentrations en MES dans le secteur Fatouville-Tancarville sont caractérisées par des concentrations plus élevées dans la partie inférieure de la colonne d'eau (Figure 16). L'analyse statistique des moyennes saisonnières montre que les écarts les plus marqués sont présents à Tancarville (Tableau 3), avec des concentrations de fond supérieures de 250 mg/l par rapport à la surface. À Fatouville, les différences sont moins marquées et les concentrations de fond sont légèrement supérieures de 100 mg/l en automne, pour les écarts les plus marqués. Cette différence s'explique par la décantation des MES vers de fond de la colonne d'eau, accentuée lors des périodes d'étales et lorsque les courants sont les plus faibles.

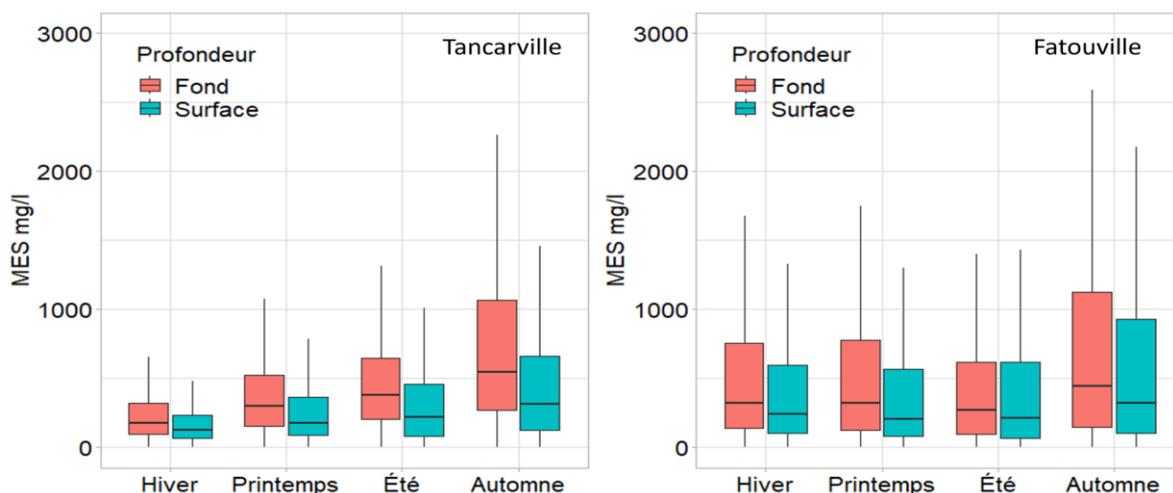


Figure 16 : Diagrammes en boîte des concentrations de MES saisonnières (toutes années comprises), pour les stations de fond et de surface à Tancarville et Fatouville.

Tableau 3 : Statistiques saisonnières (toutes années comprises) des concentrations en MES (en mg/l) (les P5 et P95 correspondent aux percentiles 5 et 95 calculés pour chacune des saisons).

Saisons	Fatouville fond			Fatouville surface			Tancarville fond			Tancarville surface		
	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95
Été	32,27	478,72	1697,47	30,87	392,43	1482,22	80,67	519,45	1466,74	46,35	340,62	858,61
Hiver	54,23	644,91	2278,88	51,06	508,84	1845,49	46,34	349,49	1140,79	37,09	224,07	627,49
Printemps	45,17	619,47	2229,68	35,70	448,85	1712,15	55,82	427,85	1240,73	42,86	283,39	850,43
Automne	43,13	764,10	2549,28	33,23	655,53	2369,56	96,91	836,73	2658,08	61,75	468,22	1282,90

### III.B. Évolution de la position du bouchon vaseux

La dynamique du bouchon vaseux a été étudiée et caractérisée à de nombreuses reprises ces dernières décennies (e.g. Avoine *et al.*, 1981). Verney *et al.*, 2017 ont notamment étudié la dynamique de ce dernier en réponse aux forçages hydro-climatiques, à la fois en termes de position et de masse. La position moyenne (ou centre de gravité) du bouchon vaseux peut être considérée comme un indicateur de la dynamique des MES à l'embouchure de l'estuaire. Le calcul de cette position à partir des données de turbidité du réseau SYNAPSES (Balise A, Fatouville, Tancarville) a été réalisé sur les 7 années de mesures communes aux 3 stations (2016-2022), avec la formule suivante :

$$xpos\_C = 365 - \frac{15 * SSC_{FAT} + 27 * SSC_{TANC}}{SSC_{BA} + SSC_{FAT} + SSC_{TANC}}$$

Avec :

**xpos\_C** : position du centre de gravité du bouchon vaseux, en point kilométrique.

SSC : concentration en MES aux différentes stations (BA pour Balise A, FAT pour Fatouville, TANC pour Tancarville)

15 : distance en kilomètre entre Balise A et Fatouville (en pk)

27 : distance en kilomètre entre Balise A et Tancarville

365 : position de la station Balise A en point kilométrique.

Cette équation permet de calculer la position du bouchon vaseux toutes les 5 minutes (échelle haute fréquence). La position médiane ou extrême, à l'échelle tidale ou mensuelle peuvent ensuite être calculées (Figure 17, Figure 18).

Cette méthode ne permet pas de déterminer les positions extrêmes du bouchon vaseux lorsqu'il est présent à l'amont de Tancarville ou bien à l'aval de Balise A (dans ces conditions le bouchon vaseux n'est pas correctement détecté sur l'ensemble des 3 stations et les résultats sont sous-estimés). L'ajout durant l'été 2022 de la station Vatteville, permettra à terme d'améliorer ces calculs et de préciser le suivi de la position du gradient de salinité (et du bouchon vaseux) lorsque celui-ci migre en amont de Tancarville.

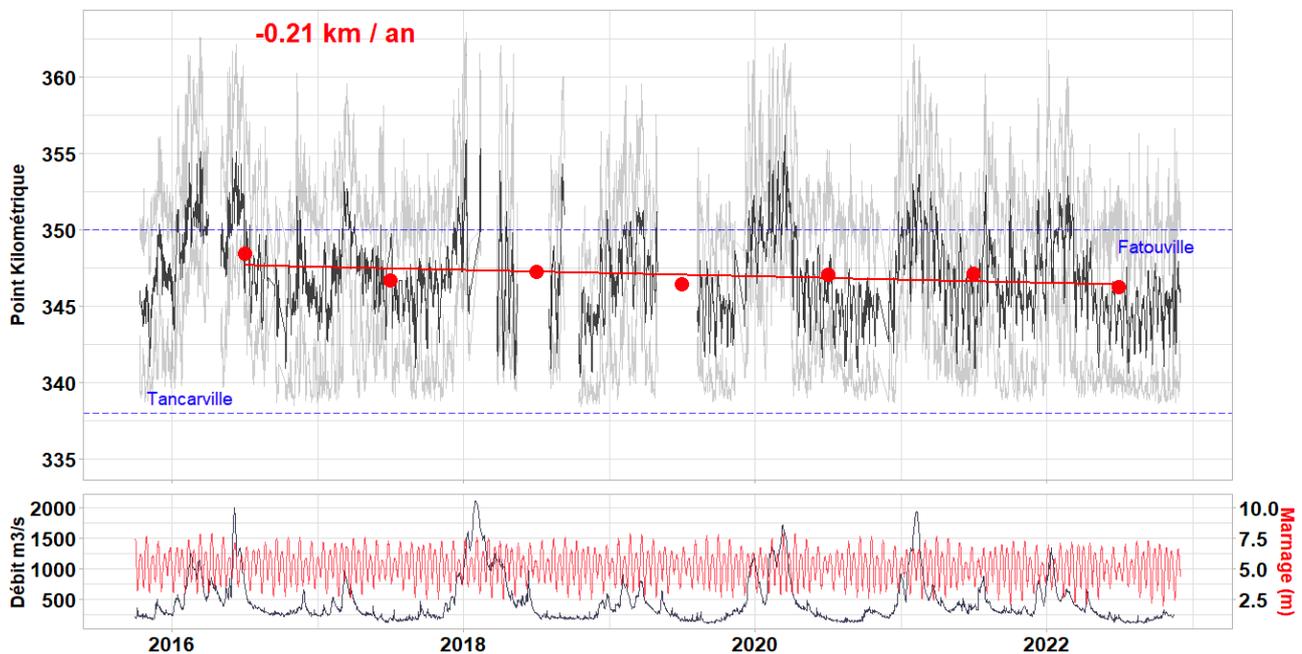


Figure 17 : Position médiane du bouchon vaseux pour chaque marée au cours du temps, en Point Kilométrique. Les lignes grisées correspondent aux positions extrêmes du bouchon vaseux par chaque marée (percentiles 5 et percentiles 95). La régression est tracée sur les moyennes des années hydrologiques (octobre-octobre, points rouges) ( $R^2 = 0.27$ ).

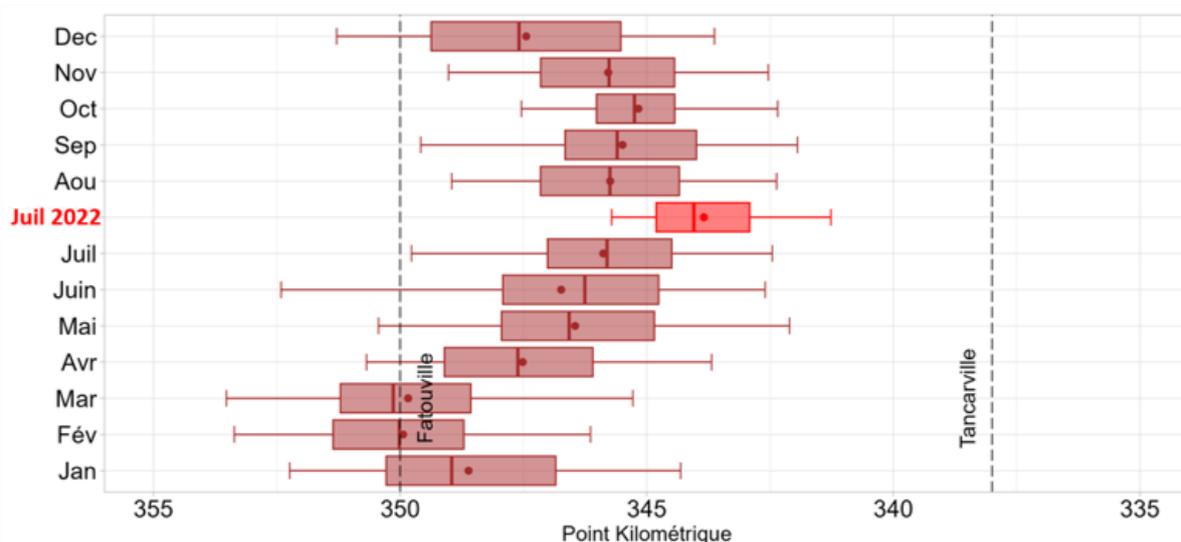
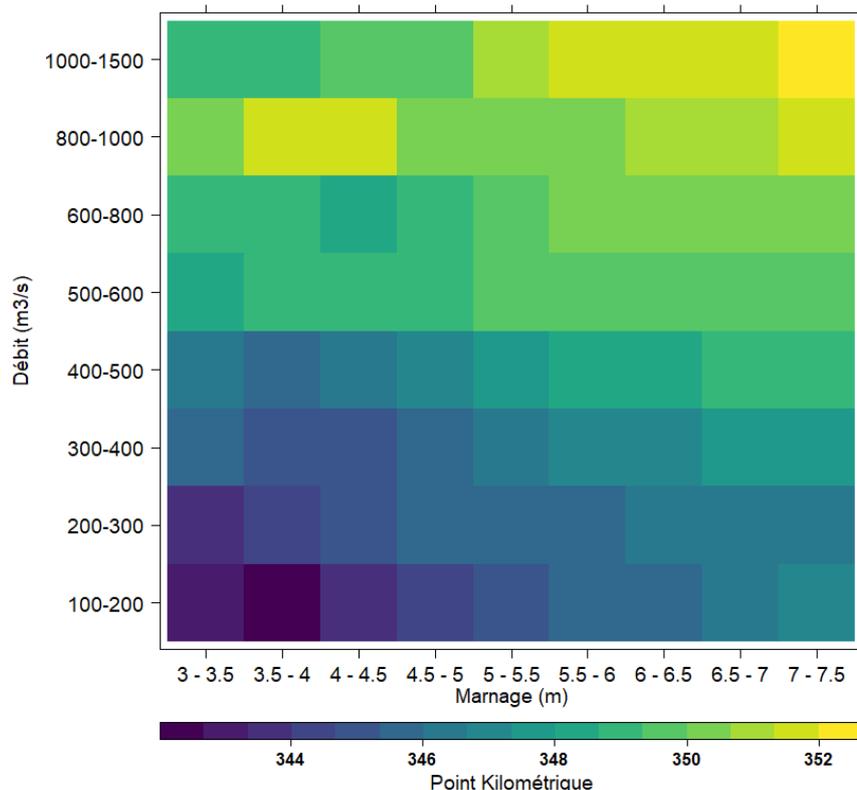


Figure 18 : Diagrammes en boîte de la position médiane (par marée) du bouchon vaseux regroupée mensuellement (2016-2022) (les lignes verticales dans les boîtes représentent la médiane annuelle, les points représentent les moyennes et les extrémités correspondent aux percentiles 5 et 95).

La série temporelle illustre les variations de la position du bouchon vaseux en fonction du débit de la Seine à l'échelle annuelle. Sa position varie entre les pk 340 et 347 en périodes d'étiage (en été, Figure 18), et entre les pk 347 et 355 en périodes de crue (en hiver, Figure 18). Les percentiles 5 et 95 calculés (extrêmes amont / extrêmes aval), montrent qu'au cours de certaines marées, le bouchon vaseux peut remonter au moins jusqu'à Tancarville (pk 338) ou descendre près de l'embouchure au pk 363. Les positions les plus amont ont été atteintes en juillet 2022.

L'influence de la marée peut être analysée via le calcul de la position moyenne du bouchon vaseux selon les classes croisées de débit et de marnage (Figure 19). Ces résultats montrent que le bouchon vaseux migre vers l'amont lorsque le débit diminue et que les marées sont les moins intenses (Brenon Le Hir, 1999), avec des positions atteintes aux pk 342-344 (près de Tancarville), pour des marnages compris entre 3 et 4 mètres (marées les plus faibles), et des débits compris

entre 100 et 300 m<sup>3</sup>/s (conditions d'étiage). À l'inverse, lorsque le débit et le marnage sont élevés, le bouchon vaseux se déplace vers l'embouchure, jusqu'aux pk 350-352 (Fatouville)<sup>6</sup>.



**Figure 19 : Positionnement moyen en PK du bouchon vaseux selon différentes classes de débit à Vernon et de marnages au Havre (les nombres d'observations utilisées pour calculer les moyennes sont présentés en Annexe 8), sur les 6 dernières années.**

Dans une moindre mesure, il a également été montré par [Grasso et al. 2018](#), que d'autres forçages tels que les vagues présentes à l'embouchure (cf. I.C.), influencent la position et la masse du bouchon vaseux en provoquant une remise en suspension des MES à l'aval. Cette remise en suspension biaise le calcul de position du bouchon vaseux et positionne celui-ci plus à l'aval qu'il ne l'est réellement. Ce constat est cependant délicat à illustrer en raison de la concomitance des épisodes de houles et de crues (durant les hivers).

**La régression linéaire tracée sur les années hydrologiques met en évidence une migration de la position médiane par marée du bouchon vaseux vers l'amont d'environ 0.21 km par an, soit une migration totale de près d'1.5 km sur la période 2016-2022 (Figure 17).** Cela est cohérent avec la diminution progressive des concentrations à Balise A et l'augmentation à Tancarville (Figure 20). À Tancarville, la tendance décrit une augmentation de 14 mg/l par an, entre 2015 et 2022, soit une augmentation de 113 mg/l au total. Au niveau de Balise A, la tendance décrit une diminution de 16 mg/l sur la période 2016-2022, soit une diminution totale de 128 mg/l. Ces évolutions sont cohérentes avec les effets attendus de l'évolution des forçages de l'estuaire sur la dynamique des MES et de la position du bouchon vaseux.

<sup>6</sup> Les valeurs de marnages sont calculées sur les hauteurs d'eau théoriques au Havre (à pleine et basse mer) le débit est mesuré à Vernon et le calcul de la position du bouchon vaseux est limité pour les positions extrêmes. Les statistiques obtenues correspondent à des estimations moyennes.

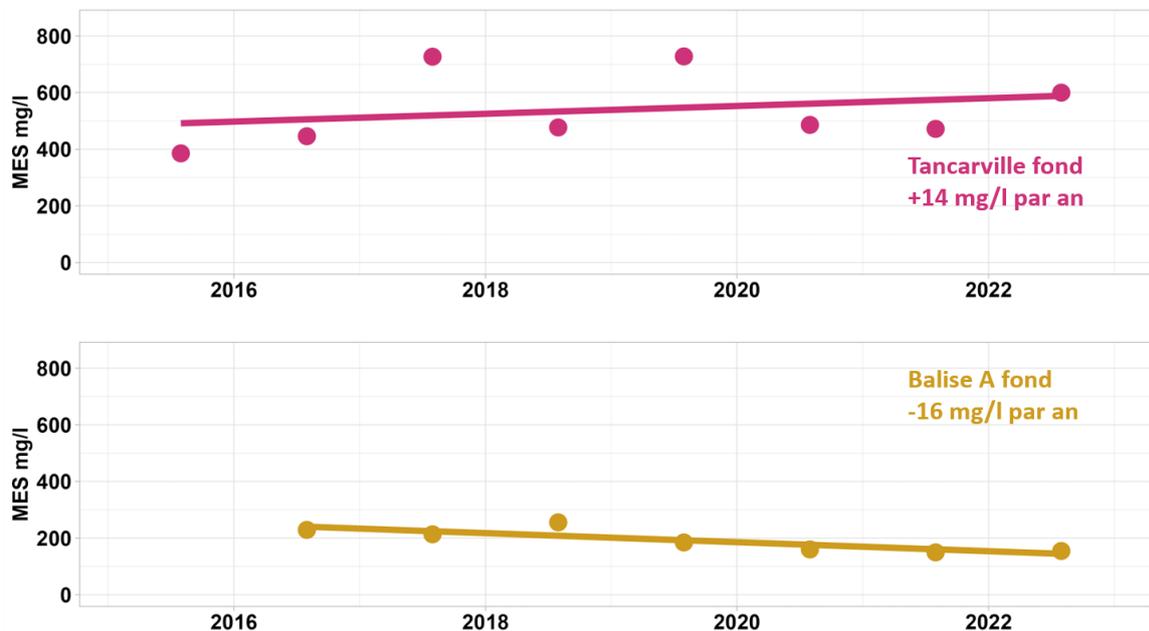


Figure 20 : Concentrations en MES moyennes calculées sur les années hydrologiques (octobre-octobre) et tendances associées à Tancarville (mesures de fond) et Balise A. (Tancarville :  $R^2 = -0.08$ . Balise A :  $R^2 = 0.64$ ).

### III.C. Concentration du bouchon vaseux

De manière analogue à la dynamique spatiale du bouchon vaseux, la masse de ce dernier est fortement dépendante des conditions hydrodynamiques. Les modélisations réalisées par Grasso *et al.* 2018 ont notamment mis en évidence une forte relation avec le marnage à l'embouchure. Les mesures SYNAPSES ne permettent pas de calculer directement la masse totale du bouchon vaseux, cependant, ces dernières peuvent être utilisées pour obtenir un indicateur de sa concentration globale en MES, représentatif de sa masse.

Cet indicateur estime la concentration médiane du centre de gravité du bouchon vaseux, pour chaque cycle de marée. En fonction de la position précédemment calculée (Figure 17), des concentrations médianes à Fatouville et Tancarville, une moyenne pondérée des concentrations est calculée par rapport à la distance entre les deux stations du bouchon vaseux. Le calcul est appliqué pour chaque cycle de marée (Figure 21) :

$$SSC_{fat,med} * \left( \frac{ABS(pos_{BV,med} - 338)}{12} \right) + SSC_{tanc,med} * \left( \frac{ABS(350 - pos_{BV,med})}{12} \right)$$

Avec :

**SSC\_med** : concentration médiane aux 2 stations (fat pour Fatouville, tanc pour Tancarville)

pos\_BV\_med : position médiane du bouchon vaseux

12 : distance en kilomètre entre Fatouville (pk 350) et Tancarville (pk 338).

Par construction, cet indicateur n'est pas pertinent durant les périodes de forts débits pour lesquelles le bouchon vaseux est situé en aval de Fatouville (cf. Figure 17).

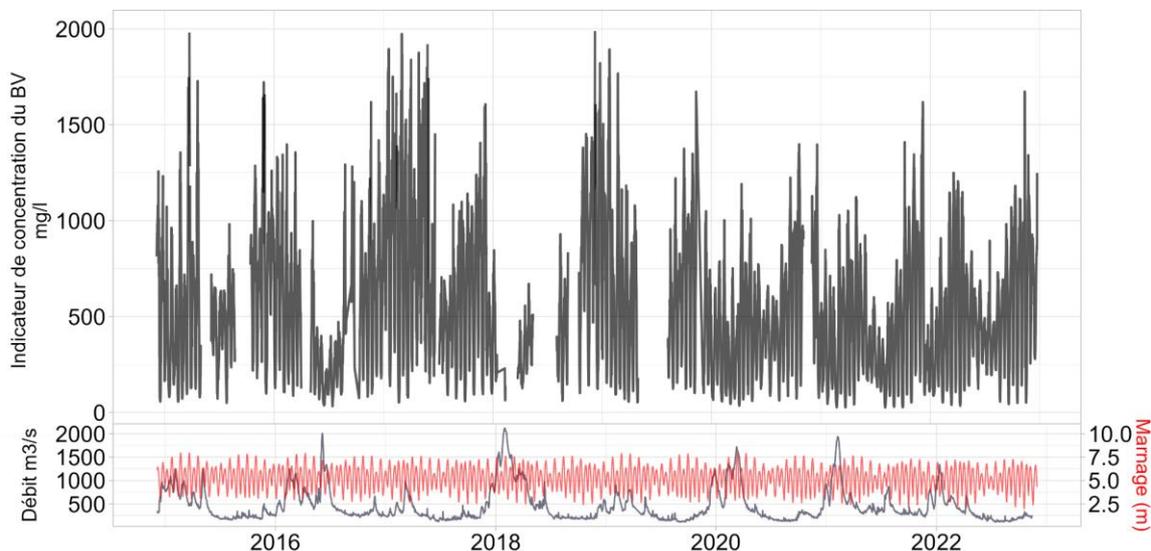


Figure 21 : Indicateur de concentration du bouchon vaseux pour chaque marée au cours du temps (mg/l).

L'indicateur de concentration du bouchon vaseux varie entre 100 mg/l au plus faible, et 1000-1500 mg/l pour les plus fortes valeurs (avec des extrêmes à 2000 mg/l). Les variations de sa concentration semblent principalement liées au marnage.

La relation entre le marnage et la concentration du bouchon vaseux est différenciée par les 2 phases que représentent le revif (période comprise entre une morte-eau et une vive-eau) et le déchet (période comprise entre une vive-eau et une morte-eau) (Figure 22). La concentration en phase de déchet est supérieure de 100 à 150 mg/l par rapport à la concentration en phase de revif. Pour les plus faibles marnages (entre 2 et 4 mètres, périodes de mortes-eaux), la concentration moyenne est comprise entre 100 et 250 mg/l et pour les marnages les plus élevés (6 à 8 mètres, périodes de vives-eaux), la concentration moyenne est jusqu'à 5 fois plus importante, entre 750 et 1250 mg/l. La concentration du bouchon vaseux augmente progressivement avec le marnage et, en cohérence avec Grasso *et al.* 2018, une hystérésis est observée, à marnage égal : des concentrations plus fortes en déchet qu'en revif. Cette différence illustre la temporalité des processus d'érosion et de sédimentation.

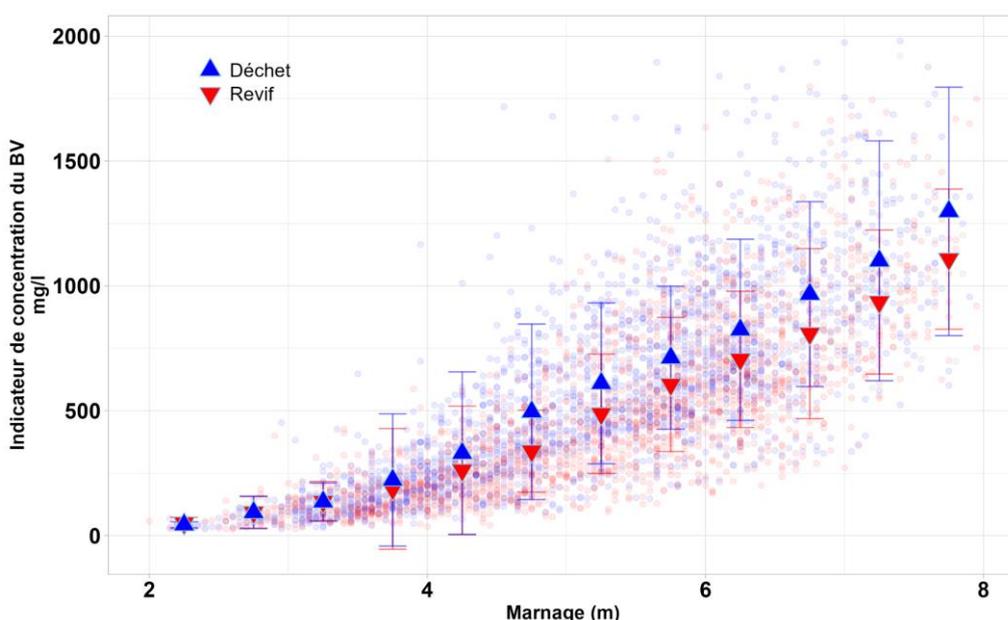


Figure 22 : Relation entre le marnage et l'indicateur de concentration du bouchon vaseux. Les points sont classés selon les phases de déchet (bleu) et les phases de revif (rouge). Les triangles représentent les moyennes par classe de marnage de 0.5 mètres, les moustaches représentent les écarts types.

## IV. Caractérisation des matières en suspension à l'amont de l'estuaire

Dans le secteur amont de l'estuaire, les concentrations de MES sont principalement dépendantes des apports sédimentaires du fleuve (e.g. Lemoine J.P. & Verney R., 2015). La marée influence également ce secteur, avec la remise en suspension des sédiments au flot et au jusant, de manière plus prononcée en périodes de vives-eaux.

Les mesures de turbidité à Val-des-Leux et à Rouen ont été converties en suivant la même méthode que pour les autres stations pour obtenir les concentrations en MES (cf. III.) (Figure 23).

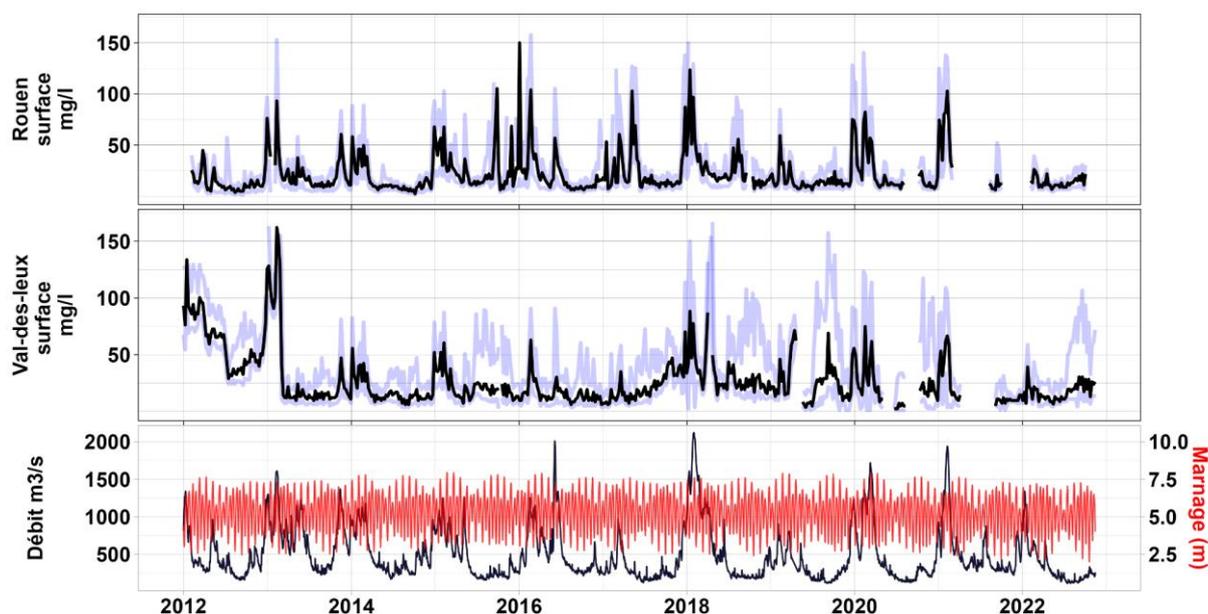


Figure 23 : Évolution des mesures de concentrations en MES (mg/l) (médianes / semaines), dans la partie amont de l'estuaire. Les enveloppes bleu clair représentent les percentiles 5 et 95 calculés par semaine. Les séries temporelles du débit à Vernon et du marnage au Havre sont également ajoutées.

Les pics de concentrations de MES coïncident avec les pics de débits pendant les épisodes de crue. Dans ces conditions, les concentrations médianes hebdomadaires peuvent dépasser les 100 mg/l et atteindre les 150 mg/l au maximum. En périodes d'étiage, les concentrations diminuent et les médianes hebdomadaires sont généralement inférieures à 25 mg/l.

### IV.A. Comparaison inter-sites

Les concentrations en MES sont légèrement supérieures à Val-des-Leux et présentent des moyennes annuelles comprises entre 20 et 45 mg/l, contre 15-30 mg/l à Rouen (Figure 24). Les percentiles 95 ne dépassent quasiment pas les 100 mg/l à Rouen et Val-des-Leux. Les variations intra-annuelles (premiers-troisièmes quartiles) fluctuent entre 10 mg/l (2022 à Rouen) et 20 mg/l (2018 à Val-des-Leux).

Les statistiques saisonnières indiquent que les concentrations les plus élevées sont enregistrées pendant les automnes à Val-des-Leux, avec des moyennes automnales jusqu'à 45 mg/l. Les plus faibles concentrations sont atteintes à Rouen pendant la période estivale et peuvent descendre jusqu'à 8 mg/l en moyenne (Annexe 5).

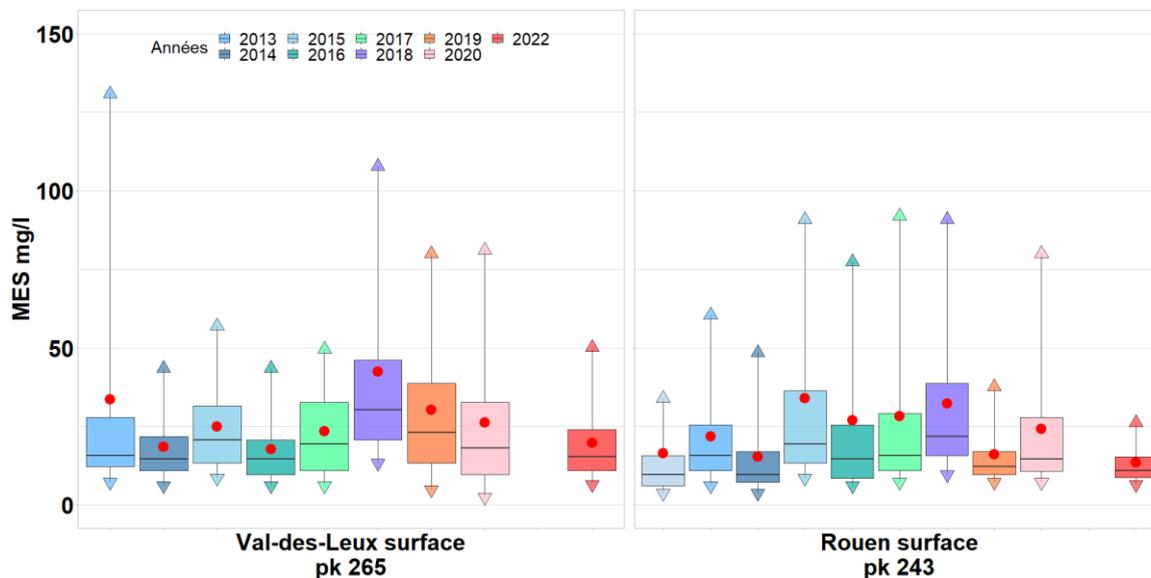


Figure 24 : Diagrammes en boîte des concentrations en MES (mg/l), dans le secteur amont (Val-des-Leux, Rouen) (les lignes horizontales dans les boîtes représentent la médiane annuelle, les triangles représentent les percentiles 5 et 95, les points rouges représentent les moyennes). Pour chaque station, les boîtes à moustache représentent une année de mesure complète.

## V. Caractérisation de la conductivité à l'amont de l'estuaire

La conductivité de l'eau est un indicateur de sa capacité à conduire le courant électrique. Elle est directement proportionnelle à la température de l'eau et à la quantité de sels minéraux présents.

Ces facteurs sont également influencés par les apports de la nappe souterraine ou encore les apports liés aux activités industrielles (Jardani *et al.*, 2012). Dans les rivières et dans la partie amont de l'estuaire, la température reste le principal facteur de régulation de la conductivité. Cette relation peut s'expliquer de plusieurs manières, avec en conditions de hautes températures, une augmentation de l'agitation des ions favorisant le passage du courant électrique, une augmentation de la solubilité des sels ou encore la dégradation accrue de la matière organique par l'activité bactérienne.

La conductivité bancarisée par le réseau SYNAPSES est la conductivité brute. Elle peut être standardisée à 25°C pour donner la conductivité spécifique, qui permet de supprimer la part des variations causées par les changements de température.

La conductivité brute a été acquise sur la période 2012-2022 (Figure 25). Cependant, l'enregistrement des mesures de la température de l'eau n'a débuté qu'en 2018. Les données brutes sont converties en conductivité spécifique standardisée à 25°C uniquement sur cette période, avec la formule suivante<sup>7</sup> :

$$Cond_{sp\acute{e}25} = Cond_{brute} / (1 + 0.02 * (temp(^{\circ}C) - 25))$$

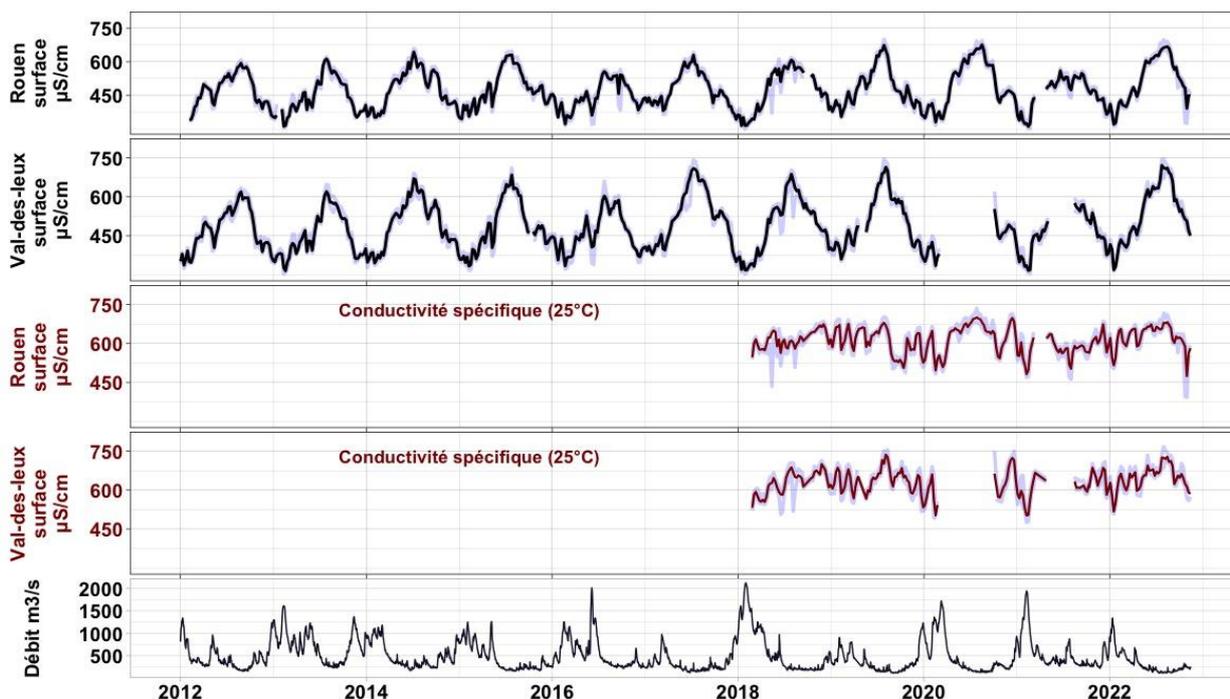


Figure 25 : Évolution des mesures de conductivité brute en  $\mu\text{S/cm}$  (médianes / semaines), dans la partie amont de l'estuaire. La conductivité spécifique (25°C) est également ajoutée (rouge).

Les séries temporelles de la conductivité brute à Rouen et Val-des-Leux montrent des variations similaires entre les deux stations, avec une saisonnalité marquée. La conductivité brute est légèrement supérieure à Val-des-leux, notamment pour les pics de conductivité (en été), qui peuvent

<sup>7</sup> La station Val-des-leux ne fournit pas de mesures de température, mais cette dernière étant située à quelques kilomètres à l'aval de Rouen, les mesures de conductivité brute de ce secteur ont également été transformées en conductivité spécifique en considérant les données de température à Rouen.

atteindre jusqu'à  $750 \mu\text{S}/\text{cm}$ , contre  $650 \mu\text{S}/\text{cm}$  à Rouen. Les médianes les plus faibles sont atteintes à  $300 \mu\text{S}/\text{cm}$  pour les deux stations (en hiver).

Les variations de la conductivité spécifique semblent quant à elles indiquer une forte relation avec le débit de la Seine. En effet, lorsque le débit est élevé, la contribution des eaux provenant des nappes et présentant une forte conductivité est relativement moins importante : la conductivité est alors plus faible. Les plus faibles médianes hebdomadaires coïncident ainsi avec les pics de débit en période de crue et les plus hautes sont atteintes en périodes d'étiage, lorsque la contribution des apports de nappes est plus importante.

## V.A. Influence du débit de la Seine sur les conductivités spécifiques

La mise en regard de la conductivité spécifique et du débit de la Seine illustre le rôle des apports des nappes sur la conductivité. Les plus hautes valeurs sont atteintes à  $640 \mu\text{S}/\text{cm}$  en moyenne à Rouen ( $670 \mu\text{S}/\text{cm}$  à Val-des-leux), lorsque les débits sont les plus faibles (inférieurs à  $200 \text{m}^3/\text{s}$ ). La conductivité diminue ensuite progressivement avec l'augmentation du débit, pour atteindre des minimums à  $480 \mu\text{S}/\text{cm}$  pour Rouen et Val-des-leux, lorsque les débits sont supérieurs à  $1800 \text{m}^3/\text{s}$  (Figure 26).

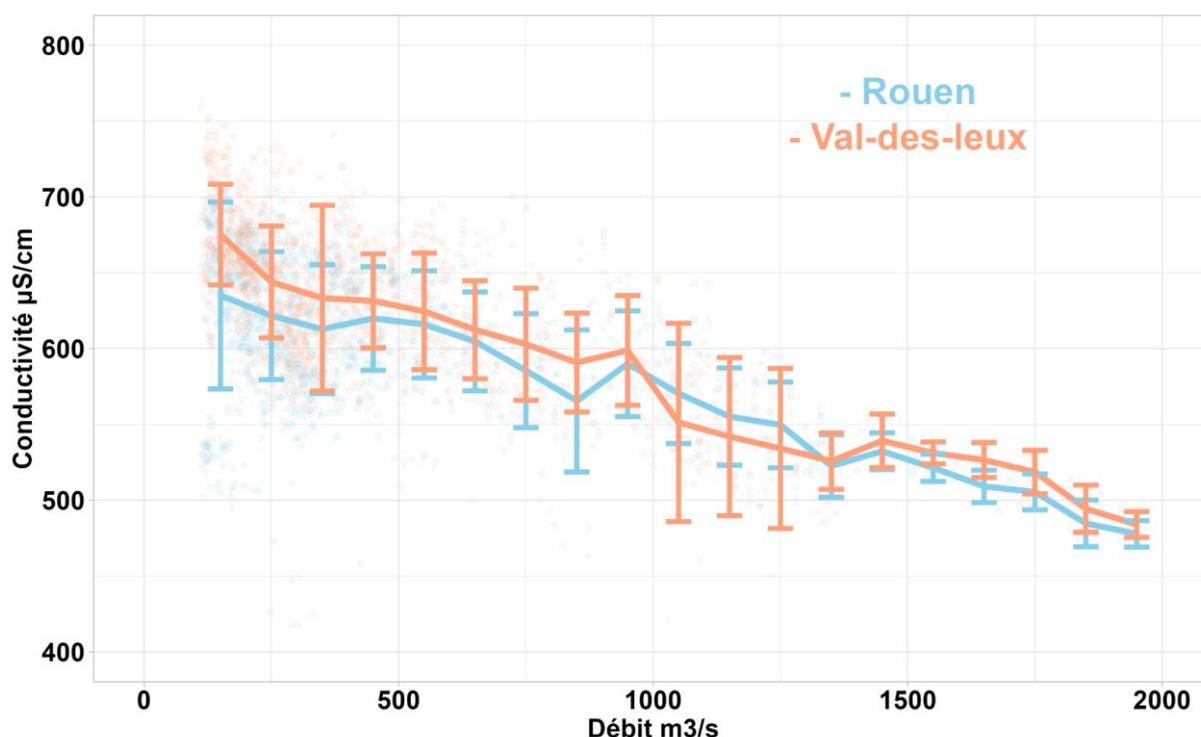


Figure 26 : Relation entre conductivité spécifique moyenne journalière ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et débit moyen journalier à Vernon ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), à Rouen et Val-des-leux. Les lignes correspondent aux conductivités spécifiques moyennes calculées par paliers de  $100 \text{m}^3/\text{s}$ . Les moustaches représentent les écarts types.

Lorsque les débits sont inférieurs à  $500 \text{m}^3/\text{s}$ , la conductivité spécifique à Val-des-Leux est supérieure à celle de Rouen de  $50 \mu\text{S}/\text{cm}$  en moyenne (contre  $15 \mu\text{S}/\text{cm}$  pour les débits de crue). Cette différence corrobore l'hypothèse faite par Dupont *et al.*, 2018, indiquant des apports de nappes non négligeables entre Rouen et Val des Leux.

## VI. Caractérisation de la température de l'eau

La température est un paramètre fondamental de la qualité d'un cours d'eau. Elle influe sur de nombreux processus physico-chimiques et biogéochimiques ainsi que sur la répartition spatiale et le développement des organismes aquatiques et des milieux naturels. Elle dépend principalement des conditions météorologiques sur le bassin versant et de ses caractéristiques hydromorphologiques. Elle peut également être impactée par des rejets thermiques à une échelle locale. Au-delà de la variation quotidienne (jour/nuit), la température de l'eau montre une saisonnalité marquée, avec des médianes hebdomadaires variant de 5°C en hiver à 25°C en été au maximum. En lien avec les différents phénomènes climatiques, la température est également soumise à des variations pluriannuelles (Figure 27).

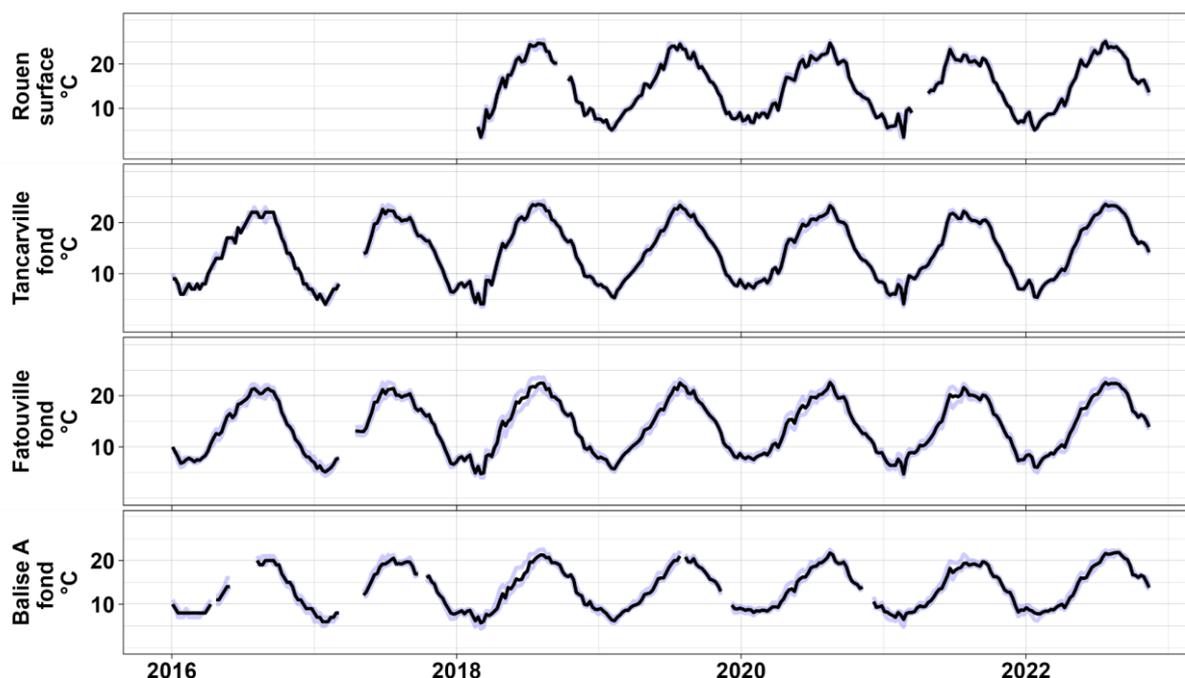


Figure 27 : Évolution de la température de l'eau de la Seine (°C médianes / semaine). Les enveloppes bleu clair représentent les percentiles 5 et 95 calculés par semaine..

### VI.A. Variations longitudinales

La température de l'estuaire est caractérisée par un gradient amont-aval (Figure 28), qui s'inverse au gré des saisons (Tableau 4 ; Annexe 7). Ce gradient s'explique notamment par les différences d'influence entre eaux continentales et eaux marines. L'amont de l'estuaire est soumis à l'influence des eaux continentales du bassin versant, plus faciles à réchauffer ou refroidir par rapport aux eaux marines, plus profondes et plus tamponnées.

En été, les températures sont plus faibles à l'aval (20°C en moyenne à Balise A et percentiles 95 jusqu'à 22°C) qu'à l'amont (22°C en moyenne à Rouen et percentiles 95 jusqu'à 25°C)<sup>8</sup>. En hiver, le gradient s'inverse, avec des températures plus faibles à l'amont (7°C en moyenne à Rouen, 8°C à Balise A).

<sup>8</sup> Ces résultats sont à relativiser vis à vis de la différence de profondeur des mesures. Le gradient vertical de température dans la colonne d'eau n'est pas quantifiable avec les données SYNAPSES.

Cela traduit des variations intra-annuelles plus marquées en remontant à l'amont de l'estuaire. Les températures les plus chaudes et les plus froides y sont observées.

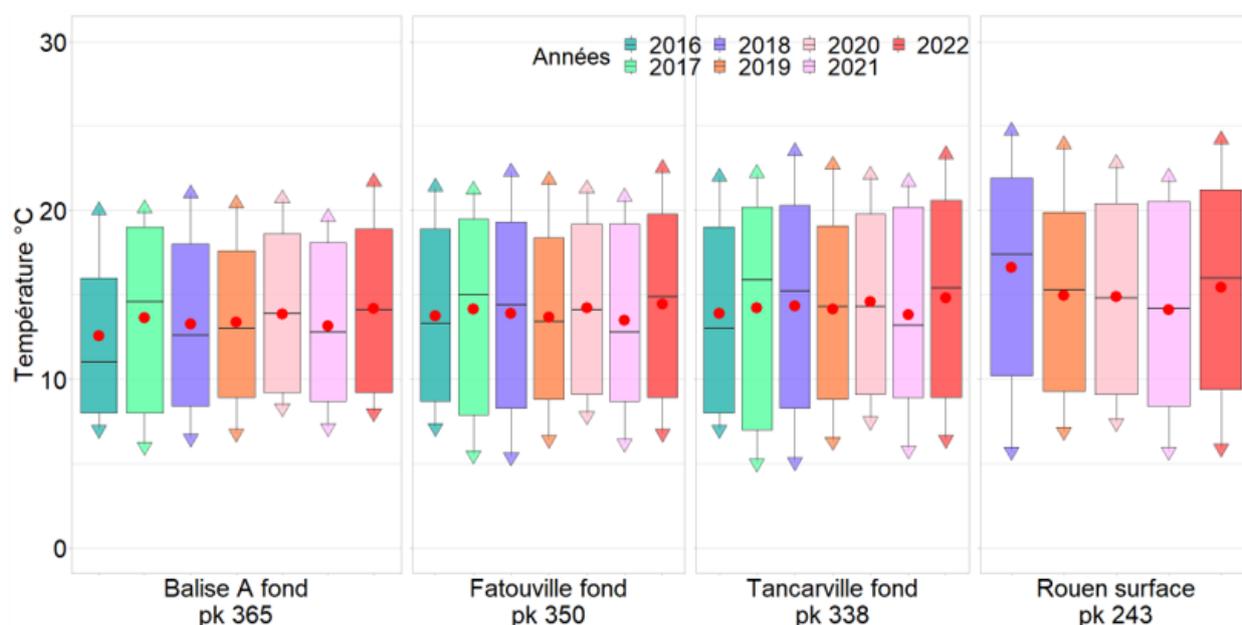


Figure 28 : Diagrammes en boîte des mesures de température annuelles, selon le gradient aval-amont. Pour chaque station, les boîtes à moustache représentent une année civile de mesure complète.

Tableau 4 : Statistiques saisonnières (été / hiver) des mesures de température en °C (les P5 et P95 correspondent aux percentiles 5 et 95 calculés pour chacune des saisons, et les pourcentages permettent de quantifier la part des mesures supérieures à 23 °C).

Saisons	Balise A fond				Fatouville fond				Tancarville fond				Rouen surface			
	P5	Moyenne	P95	% > 23 °C	P5	Moyenne	P95	% > 23 °C	P5	Moyenne	P95	% > 23 °C	P5	Moyenne	P95	% > 23 °C
Été 2016	19,00	19,83	21,00	0,00	18,40	20,37	22,00	0,00	19,00	21,15	22,00	0,00	/	/	/	/
Été 2017	16,80	19,19	20,70	0,00	17,20	20,02	22,00	0,10	17,80	20,72	22,90	3,10	/	/	/	/
Été 2018	17,10	19,87	21,80	0,10	18,70	20,91	23,20	7,60	19,20	21,85	23,90	30,60	20,10	22,90	25,20	51,40
Été 2019	17,60	19,47	21,10	0,00	18,40	20,54	22,60	1,40	19,10	21,42	23,40	10,80	19,00	22,17	24,40	42,70
Été 2020	18,20	19,70	21,70	0,00	19,00	20,37	22,60	0,60	19,70	21,13	23,30	8,80	20,00	21,76	24,60	17,20
Été 2021	17,00	18,94	20,20	0,00	18,80	20,09	21,70	0,00	19,90	20,86	22,20	0,00	19,70	20,92	22,30	0,90
Été 2022	18,80	20,72	22,10	0,00	19,40	21,51	23,00	4,10	20,40	22,34	23,80	31,50	20,10	22,98	24,90	54,30
Hiver 2016	7,00	8,36	11,00	0,00	6,60	7,93	10,00	0,00	6,00	7,76	10,00	0,00	/	/	/	/
Hiver 2017	6,00	7,04	9,00	0,00	4,80	6,21	7,80	0,00	4,00	5,96	8,00	0,00	/	/	/	/
Hiver 2018	5,20	7,45	8,70	0,00	4,40	6,85	8,70	0,00	3,90	6,74	8,90	0,00	3,20	6,26	10,20	0,00
Hiver 2019	6,10	7,86	9,20	0,00	5,60	7,54	9,40	0,00	5,30	7,41	9,70	0,00	5,20	7,59	9,90	0,00
Hiver 2020	8,00	8,67	9,40	0,00	7,40	8,35	9,70	0,00	7,10	8,26	9,80	0,00	6,60	8,29	10,30	0,00
Hiver 2021	6,20	7,84	9,30	0,00	4,90	7,36	9,20	0,00	4,20	7,23	9,60	0,00	3,60	7,12	10,00	0,00
Hiver 2022	7,00	8,42	9,50	0,00	5,80	7,82	9,20	0,00	5,30	7,64	9,20	0,00	5,20	7,82	9,60	0,00

## VI.B. Évolution des températures

Certaines études ont mis en évidence l'augmentation de la température de l'eau en Seine (à Paris) et en baie de Seine (Rivière et al., 2021). Les mesures de température de l'eau à Oissel, disponibles sur la période 2012-2022, confirment ces tendances (Figure 29).

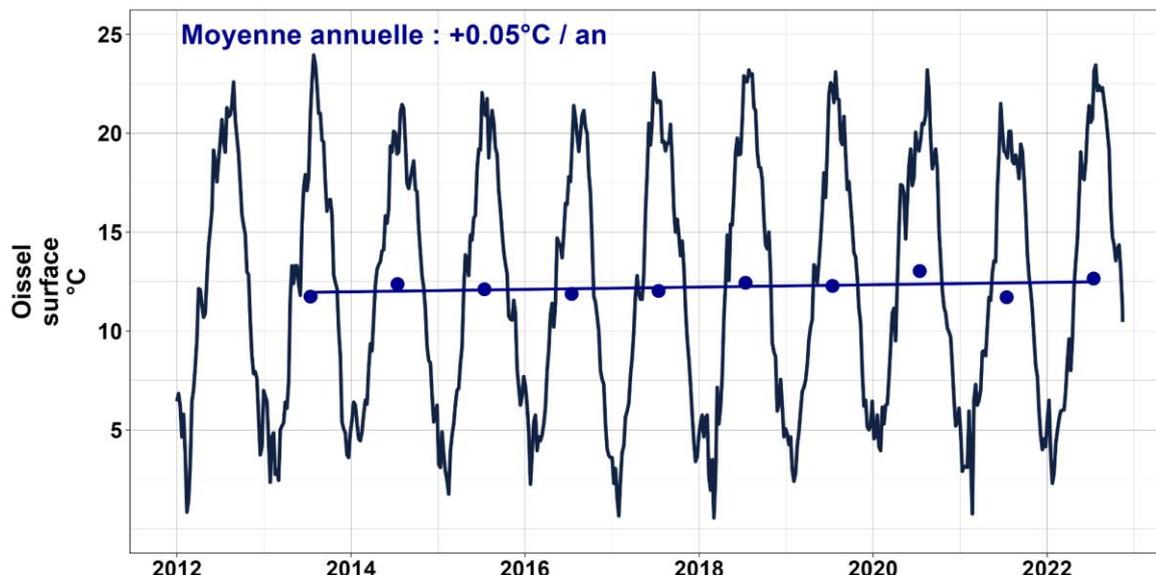


Figure 29 : Évolution de la température de l'eau à Oissel (médiane / semaine, en °C). La droite de tendance en bleue est tracée sur les moyennes des années hydrologiques octobre-octobre ( $R^2 = 0.08$ ).

La régression linéaire tracée sur la période 2012-2022 à Oissel présente une augmentation progressive de la température de l'eau, au rythme de  $0.05^\circ\text{C}$  par an (+  $0.45^\circ\text{C}$  sur les 10 années). Cette analyse de la variabilité des moyennes inter-annuelles peut être complétée par l'étude des variations inter-saisonniers, par exemple estivales, pour se focaliser sur les plus hautes températures (Figure 30). Les régressions sont ici tracées sur les moyennes estivales pour les stations Balise A, Fatouville, Tancarville et les mesures à Oissel<sup>9</sup>. Les résultats pour le printemps, l'hiver, et l'automne sont présentés dans le tableau 5.

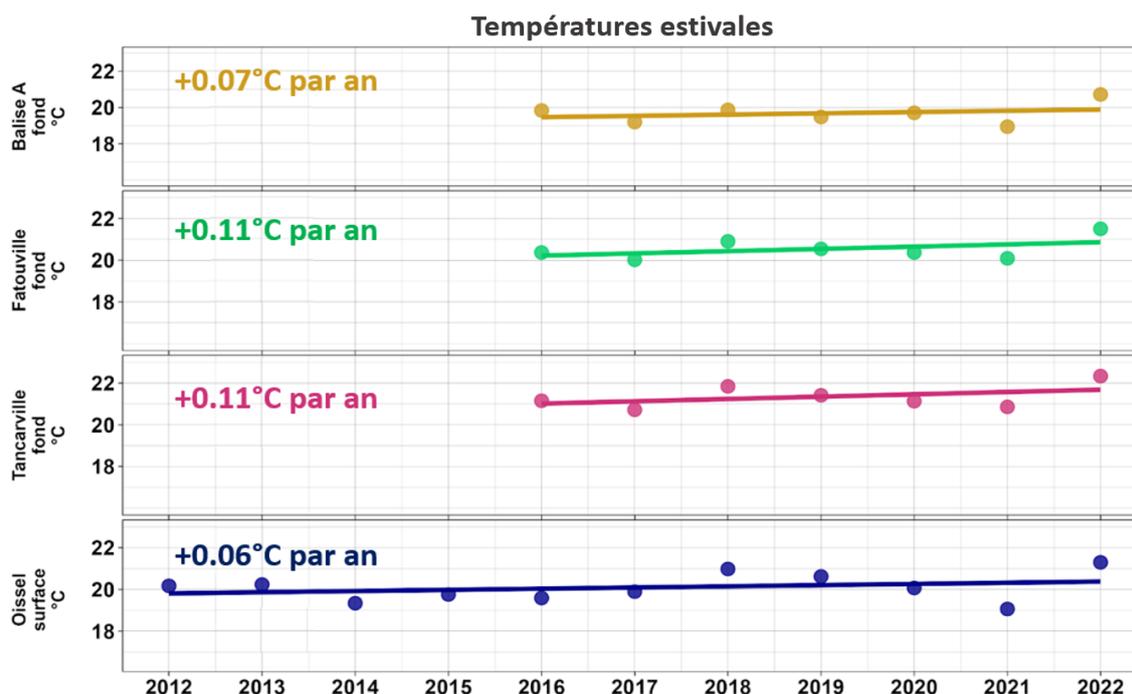


Figure 30 : Évolution des températures selon les moyennes estivales. Les stations Tancarville (rose), Fatouville (vert), et Balise A (Jaune) sont rajoutées à titre indicatif, malgré des séries temporelles diminuées.  $R^2$  Balise A = 0.01,  $R^2$  Fatouville = 0.2,  $R^2$  Tancarville = 0.18,  $R^2$  Oissel = 0.08.

<sup>9</sup> Les droites ne couvrent pas les mêmes périodes pour les stations SYNAPSES, et la comparaison de ces tendances est à relativiser.

Tableau 5 : Résultats des régressions linéaires pour chaque saison.

	Eau Oissel	Eau Tancarville	Eau Fatouville	Eau Balise A
Ete	P = 0.06°C / an, R <sup>2</sup> = 0.08	P = 0.11°C / an, R <sup>2</sup> = 0.18	P = 0.11°C / an, R <sup>2</sup> = 0.2	P = 0.07°C / an, R <sup>2</sup> = 0.01
Hiver	P = 0°C / an, R <sup>2</sup> = -0.01	P = 0.16°C / an, R <sup>2</sup> = 0.2	P = 0.16°C / an, R <sup>2</sup> = 0.17	P = 0.16°C / an, R <sup>2</sup> = 0.2
Printemps	P = 0.09°C / an, R <sup>2</sup> = -0.02	P = -0.16°C / an, R <sup>2</sup> = -0.01	P = -0.19°C / an, R <sup>2</sup> = -0.04	P = 0.03°C / an, R <sup>2</sup> = -0.18
Automne	P = 0.13°C / an, R <sup>2</sup> = 0.04	P = 0.16°C / an, R <sup>2</sup> = 0.54	P = 0.13°C / an, R <sup>2</sup> = 0.5	P = 0.16°C / an, R <sup>2</sup> = 0.45

Les régressions tracées sur les températures estivales de l'eau indiquent une tendance à l'augmentation des températures, pour l'ensemble des stations. À Oissel, la pente est estimée à +0.06°C par an, soit une augmentation globale dépassant les 0.5°C sur cette période. Les stations SYNAPSES à l'aval de l'estuaire (Balise A, Fatouville, Tancarville) présentent également des tendances à l'augmentation sur leurs périodes respectives, avec une pente à +0.07°C par an à Balise A (+0.42°C entre 2016 et 2022), et des pentes à +0.11°C par an à Fatouville et Tancarville (+0.66°C entre 2016 et 2022). Cette augmentation de la température des eaux de l'estuaire est cohérente avec celle observée au niveau atmosphérique, dans un contexte de changement climatique.

## VII. Caractérisation des concentrations en oxygène dissous

Une bonne oxygénation des eaux est nécessaire aux poissons et autres organismes aquatiques pour la respiration et la décomposition de la matière organique. De trop faibles concentrations en oxygène dissous (*i.e.* hypoxie :  $[O_2] < 3 \text{ mg/l}$  ; anoxie :  $[O_2] < 1 \text{ mg/l}$ ) ont ainsi des effets néfastes sur la faune aquatique. L'un des principaux paramètres de régulation de l'oxygène dissous est la température, même si d'autres facteurs influencent les concentrations. C'est notamment le cas de la décomposition de la matière organique par l'activité microbienne, l'aération, le débit, la respiration des organismes, la photosynthèse ou encore la salinité dont l'augmentation fait diminuer les concentrations en oxygène dissous.

Les séries temporelles des médianes hebdomadaires montrent une saisonnalité marquée (Figure 31). Les concentrations les plus élevées sont atteintes en hiver, jusqu'à 15 mg/l à Rouen, dû à la solubilité de l'oxygène plus importante en eau froide, une agitation et réoxygénation plus élevées par les forts débits. En été, les concentrations sont au plus faibles et diminuent jusqu'à 5 mg/l à Tancarville (solubilité réduite, agitation et réoxygénation amoindries par les faibles débits et décomposition de la matière organique).

Ces variations ne sont pas que saisonnières et la concentration en oxygène dissous est également soumise aux fluctuations quotidiennes (augmentation le jour causée par la photosynthèse et diminution la nuit causée par la respiration des organismes (Harvey *et al.*, 2011)).

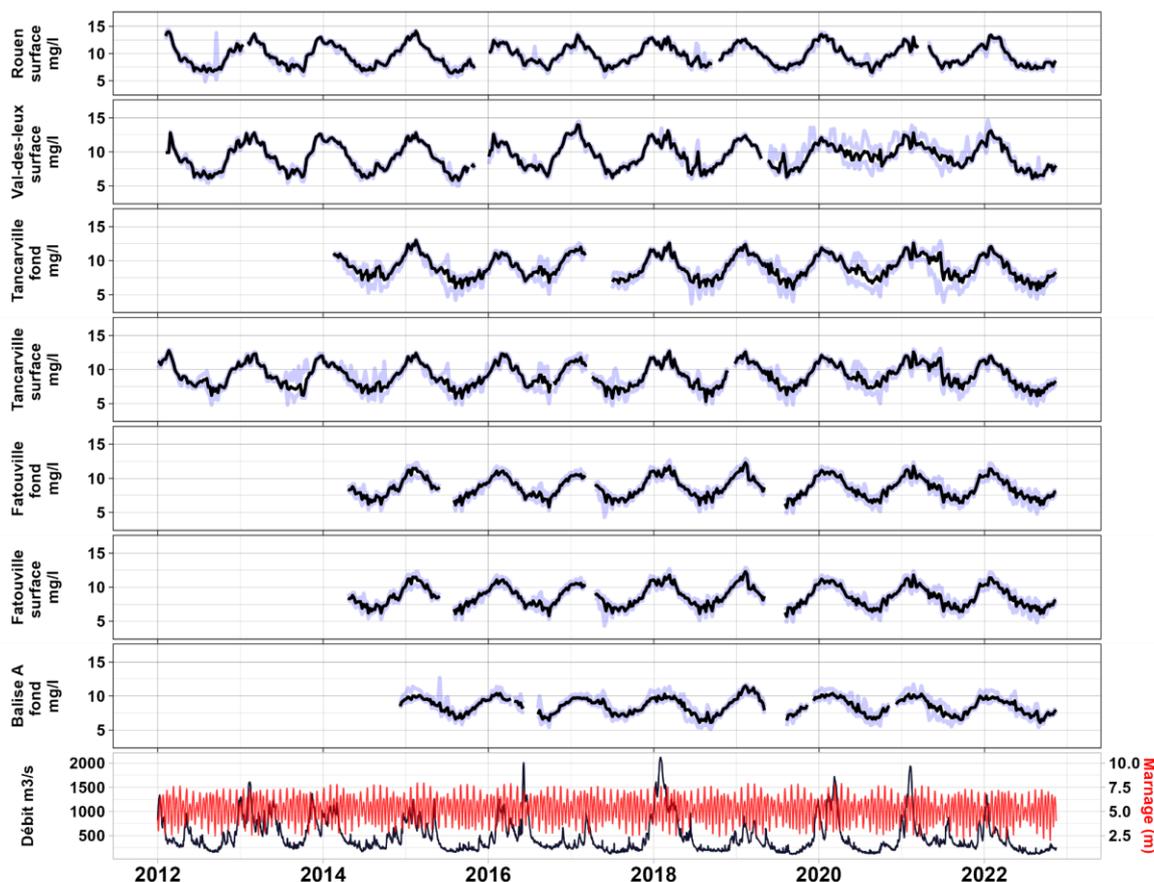


Figure 31 : Évolution des mesures de concentration en oxygène dissous, en mg/l (médianes / semaines). Les enveloppes bleu clair représentent les percentiles 5 et 95, calculés par semaine. Les séries temporelles du débit à Vernon et du marnage au Havre sont également ajoutées.

### III.A. Variations longitudinales

L'oxygénation dans l'estuaire de la Seine est caractérisée par des concentrations plus faibles à l'aval qu'à l'amont.

Plusieurs facteurs sont à l'origine de ce gradient longitudinal tels que la présence du gradient de salinité ou encore la présence du bouchon vaseux. Ce dernier a notamment pour conséquence de limiter la pénétration lumineuse et la production d'oxygène par photosynthèse mais surtout, de favoriser l'accumulation et la dégradation de la matière organique piégée en son sein par l'activité bactérienne. Cette dégradation consomme l'oxygène et est ainsi associée à une diminution de la concentration en oxygène dissous (Romana *et al.*, 1990).

Les moyennes annuelles sont comprises aux alentours de 8.5 mg/l à l'embouchure (Balise A, Fatouville), contre 9.5 mg/l à Rouen (Figure 32). Les extrêmes suivent le même gradient, avec les concentrations les plus faibles atteintes à l'aval (percentiles 5 à 6 mg/l à Balise A et Tancarville en été, Tableau 6) et les plus élevées atteintes à l'amont (percentiles 95 à 13 mg/l à Rouen et Val-des-Leux en hiver, Tableau 6). Selon les années, les différences de concentrations entre l'amont (surface) et l'aval (fond) varient de 0.5 à 2 mg/l et la quantification du gradient fond-surface montre que ce dernier n'explique qu'une faible proportion de ces différences (cf. III.B.).

Les variations intra-annuelles sont plus importantes dans la partie amont de l'estuaire et pourraient s'expliquer par les variations de température plus marquées dans ce secteur.

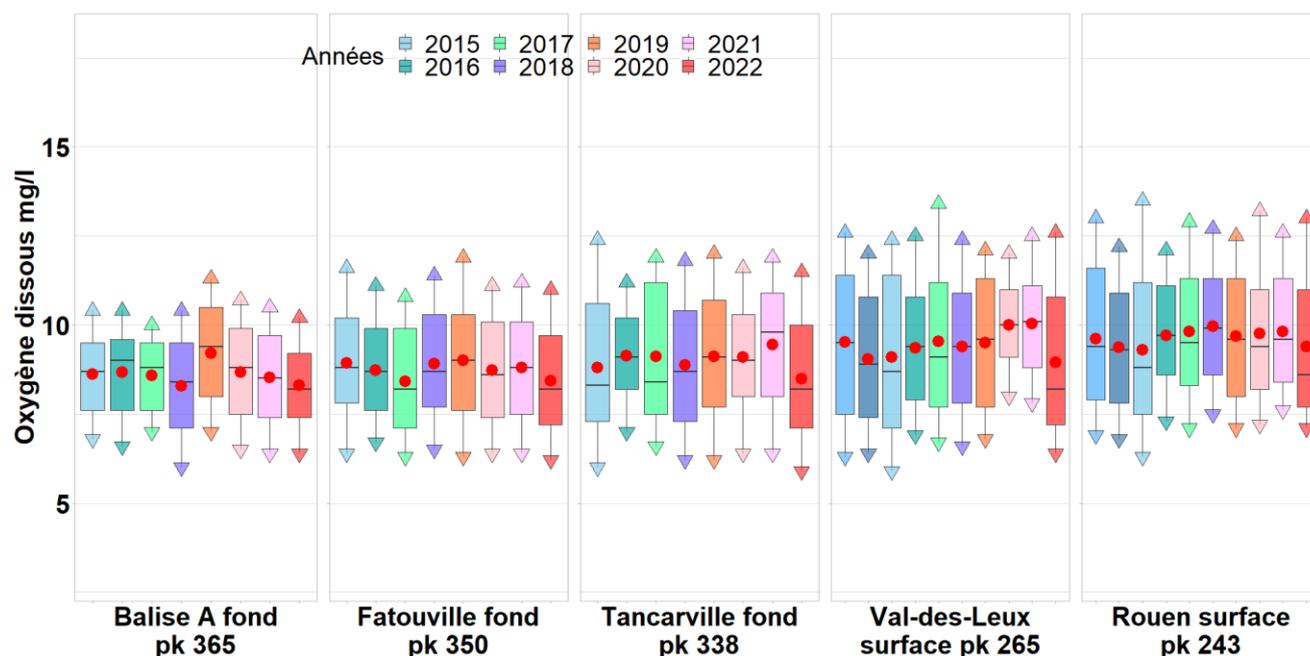


Figure 32 : Diagrammes en boîte des concentrations en oxygène dissous, selon le gradient aval-amont (Balise A, Fatouville, Tancarville, Val-dès-Leux, Rouen). Pour chaque station, les boîtes à moustache représentent une année civile de mesure complète.

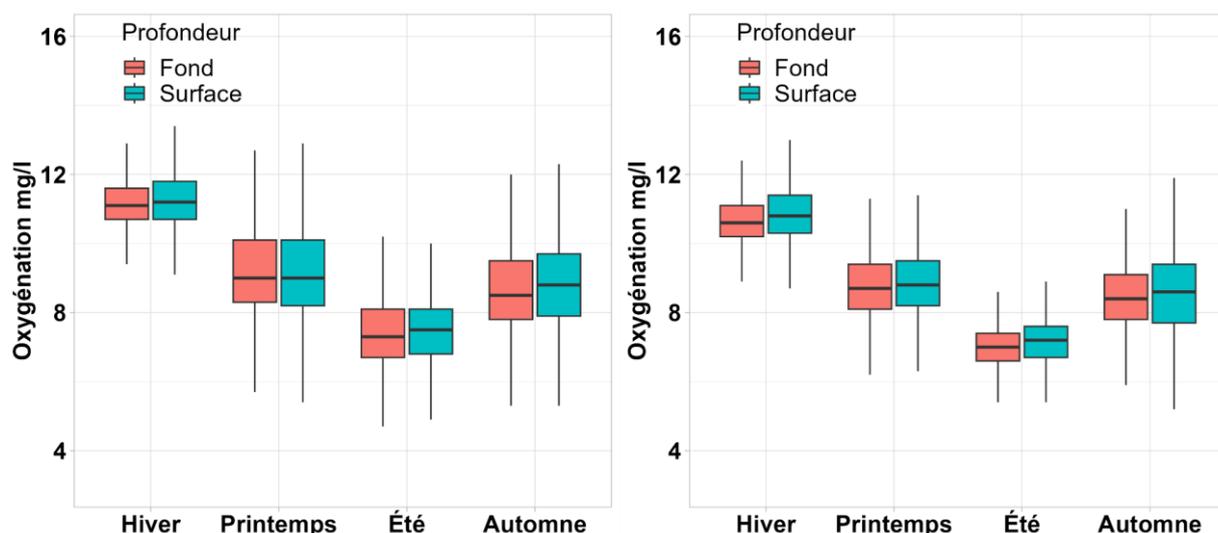
**Tableau 6 : Statistiques saisonnières (été / hiver) des mesures d'oxygène dissous en mg/l (les P5 et P95 correspondent aux percentiles 5 et 95 calculés pour chacune des saisons. Statistiques complètes en Annexe 8.**

Saisons	Balise A fond			Fatouville fond			Tancarville fond			Val-des-Leux surface			Rouen surface		
	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95
Été 2012	/	/	/	/	/	/	/	/	/	5,90	6,61	7,20	6,30	7,10	7,90
Été 2013	/	/	/	/	/	/	/	/	/	6,00	7,07	7,80	6,70	7,73	8,50
Été 2014	/	/	/	5,90	6,96	7,90	6,10	7,99	9,60	6,10	7,12	8,40	6,60	7,56	8,70
Été 2015	6,40	7,33	8,80	5,60	6,75	7,60	5,30	7,09	8,90	5,40	6,60	7,80	6,10	6,99	8,00
Été 2016	6,00	7,02	8,50	6,20	7,36	8,50	6,60	8,20	10,00	6,30	7,54	8,30	6,90	8,23	9,10
Été 2017	6,60	7,30	8,00	6,10	6,92	7,80	6,20	7,28	8,20	6,30	7,39	8,30	7,10	8,20	9,30
Été 2018	5,50	6,67	8,00	5,80	7,15	8,30	5,40	6,96	8,00	6,40	7,56	9,80	7,30	8,33	10,20
Été 2019	6,10	7,12	7,70	5,20	6,59	7,30	5,00	7,07	9,00	6,30	7,74	10,00	6,80	7,57	8,40
Été 2020	6,10	7,07	8,30	5,90	7,00	8,20	5,80	7,60	10,00	7,40	9,38	11,50	6,40	7,81	8,80
Été 2021	6,10	7,03	8,20	6,10	7,10	8,40	5,50	7,64	9,30	7,60	8,61	10,00	7,20	8,18	8,80
Été 2022	6,00	7,04	8,20	5,70	6,87	7,90	5,10	6,56	7,60	6,10	6,83	7,80	7,00	7,52	8,30
Hiver 2012	/	/	/	/	/	/	/	/	/	9,90	10,64	12,80	10,40	12,23	14,20
Hiver 2013	/	/	/	/	/	/	/	/	/	10,70	11,73	12,80	10,60	12,24	13,60
Hiver 2014	/	/	/	9,80	9,89	9,95	/	/	/	10,90	11,63	12,20	10,80	11,71	12,50
Hiver 2015	9,20	9,92	10,90	9,80	10,87	11,90	10,70	11,76	12,90	11,00	11,85	12,80	11,50	12,67	14,10
Hiver 2016	9,20	9,91	10,90	9,20	10,42	11,40	8,50	10,30	11,40	9,80	11,10	12,70	10,20	11,63	12,50
Hiver 2017	9,20	9,68	10,20	9,80	10,40	11,00	10,70	11,44	12,30	10,60	12,33	14,20	10,50	11,73	13,40
Hiver 2018	9,10	9,85	10,90	9,90	10,88	12,00	10,10	11,24	12,60	10,50	11,76	13,10	10,70	11,91	13,10
Hiver 2019	9,40	10,56	11,50	9,40	10,86	12,40	10,40	11,37	12,40	10,80	11,68	12,50	10,90	11,85	12,70
Hiver 2020	9,40	10,15	11,00	9,90	10,71	11,40	10,00	11,04	11,90	10,00	11,23	12,20	10,40	12,42	13,70
Hiver 2021	9,00	9,91	11,00	9,60	10,60	11,80	9,80	11,09	12,60	10,30	11,65	13,10	10,20	11,70	12,90
Hiver 2022	9,10	9,72	10,70	9,50	10,51	11,80	9,90	10,97	12,10	10,20	11,90	13,20	10,70	12,26	13,40

### III.B. Comparaison des mesures fonds surfaces

L'oxygène dissous fait partie des paramètres présentant un gradient surface/fond mesuré pour les stations Fatouville et Tancarville (Figure 33). L'origine de ce gradient est multifactorielle. Elle est liée aux différences de températures entre le fond et la surface de la colonne d'eau, à une ré-aération par l'atmosphère plus importante en surface, un ensoleillement plus important, facilitant la photosynthèse et la production d'oxygène (Morelle J., 2017), une salinité plus élevée et des concentrations en MES plus fortes au sein du bouchon vaseux en profondeur.

Les diagrammes en boîte indiquent une légère différence de concentration entre le fond et la surface pour les deux stations, avec des concentrations plus élevées dans la partie supérieure de la colonne d'eau et ce, pour chacune des saisons. L'analyse statistique des moyennes saisonnières (Tableau 7) montre que les écarts les plus marqués sont enregistrés pendant l'hiver à Fatouville (+ 0.29 mg/l en surface) et au printemps à Tancarville (+ 0.31 mg/l en surface). En moyenne les concentrations de surface sont supérieures de 0.18 mg/l à Fatouville, et de 0.19 mg/l à Tancarville.



**Figure 33 : Diagrammes en boîte des concentrations en oxygène dissous saisonnières (toutes années comprises), pour les stations de fond et de surface à Tancarville et Fatouville.**

Tableau 7 : Statistiques saisonnières des mesures d'oxygène dissous en mg/l (les P5 et P95 correspondent aux percentiles 5 et 95 calculés pour chacune des saisons).

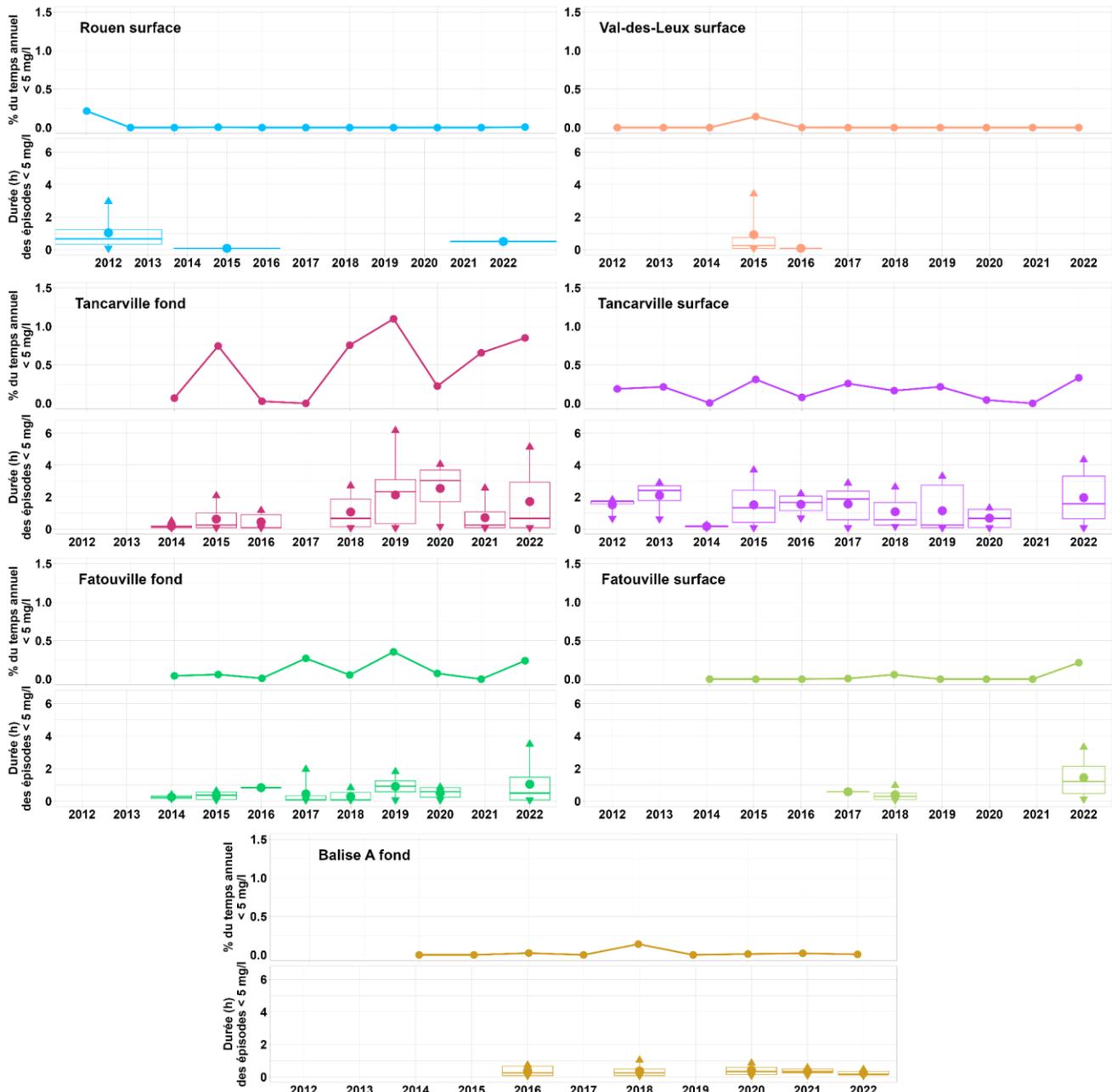
Saisons	Fatouville fond			Fatouville surface			Tancarville fond			Tancarville surface		
	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95
Été	5,83	6,97	7,99	6,05	7,20	8,35	5,67	7,38	8,96	5,95	7,51	9,07
Hiver	9,66	10,57	11,52	9,83	10,86	11,90	10,01	11,15	12,28	10,08	11,24	12,33
Printemps	7,60	8,77	9,98	7,40	8,80	10,35	7,15	9,09	10,83	7,50	9,13	10,65
Automne	7,03	8,46	10,03	7,01	8,62	10,26	6,84	8,63	10,46	6,98	8,78	10,62

### III.C. Évolution des désoxygénations

Les évolutions des forçages peuvent renforcer le risque de désoxygénation des eaux définis selon les seuils suivants :

- Un seuil léthal à 1 mg/l (*i.e.* anoxie) se traduisant par une asphyxie et une mortalité des organismes.
- Un seuil critique de 3 mg/l (*i.e.* hypoxie), induisant une difficulté et une menace pour les organismes.
- Un seuil sensible de 5 mg/l, associé à un développement perturbé d'un grand nombre d'organismes aquatiques.

Des valeurs inférieures à ces seuils étaient régulièrement mesurées jusqu'au début des années 2000, en lien avec des rejets urbains et industriels (Romero *et al.*, 2016). Depuis cette période, le seuil de 3 mg/l n'est presque jamais atteint. Ainsi, seul le pourcentage de temps passé dans des gammes de concentration en oxygène dissous inférieures au seuil sensible de 5 mg/l a été calculé, pour suivre l'évolution de la durée des périodes de désoxygénation sur les 10 ans d'étude (Figure 34).



**Figure 34 : Pourcentages annuels de mesures avec des concentrations en oxygène dissous inférieures à 5 mg/l et diagrammes en boîte des durées consécutives des périodes de désoxygénation (heures).**

Dans la partie amont de l'estuaire, les mesures inférieures à 5 mg/l sont rares. Seules les années 2012 à Rouen et 2015 à Val-des-leux, présentent des valeurs d'oxygénation inférieures à 5 mg/l mais sur des durées faibles (1 heure consécutive en moyenne). Dans la partie la plus aval de l'estuaire, le constat est le même pour les stations de Balise A et Fatouville (fond et surface), avec de très faibles pourcentages qui ne dépassent pas les 0.4% (pic en 2019 avec 0.4% des mesures pour une durée consécutive moyenne d'une heure à Fatouville fond). À Tancarville, les pourcentages sont légèrement supérieurs mais restent relativement faibles. Les mesures de fond à Tancarville indiquent que 0.1 à 1.5% des mesures sont inférieures à 5 mg/l à Tancarville, pour des durées de désoxygénation de 1.2 heures en moyenne. En surface, les pourcentages diminuent aux alentours de 0.25%, pour des durées moyennes de désoxygénation de 1.4 heures.

Sur l'ensemble de la période 2012-2022, les concentrations en oxygène dissous ne passent que très peu sous le seuil sensible de 5 mg/l. Les déficits en oxygène ne représentent pas de risques particuliers pour la plupart des organismes aquatiques.

Pour compléter sur les risques de désoxygénation, l'évolution des plus faibles concentrations peut être analysée (Figure 35). Les risques étant généralement les plus élevés lors de la période estivale,

un focus est fait sur les extrêmes (percentiles 5) de l'ensemble des étés. À l'aide de régressions linéaires, une tendance peut être estimée pour chacune des stations.

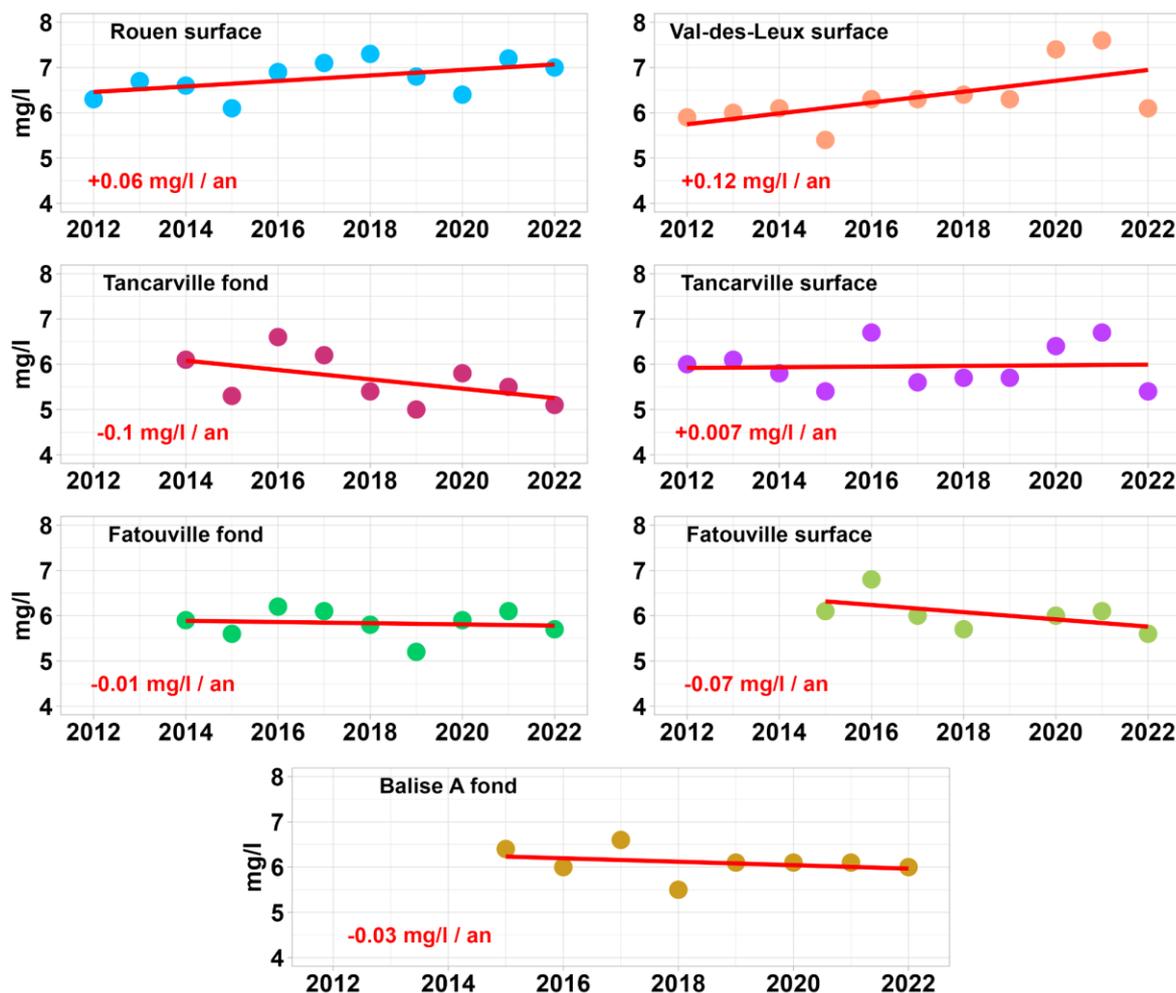


Figure 35 : Percentiles 5 estivaux des mesures d'oxygène dissous et tendances associées.  $R^2$  Rouen = 0.2,  $R^2$  Val-des-Leux = 0.32,  $R^2$  Tancarville fond = 0.17,  $R^2$  Tancarville surface = -0.1,  $R^2$  Fatouville fond = -0.12,  $R^2$  Fatouville surface = 0.15,  $R^2$  Balise A = -0.07.

À l'amont, une augmentation globale des concentrations les plus faibles en oxygène dissous est observée, principalement marquée à la station de Val-des-Leux. Avec une pente estimée à +0.12 mg/l par an, soit une augmentation de 1.2 mg/l sur la période 2012-2022, ce secteur s'éloigne toujours un peu plus du risque de désoxygénation. À Rouen, la tendance est un peu moins marquée, avec une pente estimée à +0.06 mg/l par an, soit une augmentation totale de 0.6 mg/l.

À l'aval, la tendance s'inverse, avec de très légères diminutions des concentrations les plus faibles en oxygène dissous sur les stations de Fatouville et Balise A (-0.01 et -0.07 mg/l par an à Fatouville, -0.03 mg/l par an à Balise A). À Tancarville, la tendance est quasiment nulle en surface (+0.007 mg/l par an entre 2012 et 2022), mais la diminution est beaucoup plus marquée au fond, avec une pente à -0.1 mg/l par an, soit une diminution de 0.8 mg/l sur la période 2014-2022. Cette différence est à rapprocher de la remontée du bouchon vaseux, dont les concentrations en MES plus élevées en profondeur sont susceptibles d'y engendrer des désoxygénations plus importantes. Au fond de la colonne d'eau de ce secteur, l'augmentation des périodes de désoxygénation s'accompagne ainsi d'un rapprochement des extrêmes vers le seuil sensible de 5 mg/l, représentant un potentiel risque pour les organismes aquatiques, dans les années à venir.

## Conclusion

Le réseau SYNAPSES a permis l'acquisition de plus de 35 millions de mesures sur la période 2012-2022. Outre l'aspect descriptif des données, la présente étude a mis en évidence des premières évolutions de la qualité de l'eau de l'estuaire de la Seine sur cette décennie. Ces observations font ressortir plusieurs éléments clés, qui sont à mettre en lien direct avec l'évolution des forçages de l'estuaire, notamment la diminution constatée du débit et l'augmentation du niveau marin.

### Front de salinité



### Sur la dynamique du front de salinité :

- Augmentation progressive de la salinité dans le secteur de Tancarville sur la période 2016 - 2022, avec +1 PSU pour les mesures de fond, et +0.5 PSU pour les mesures de surface.
- **Migration du front de salinité de 3.5 km vers l'amont de l'estuaire entre 2016 et 2022.**

### Bouchon vaseux



### Sur la dynamique du bouchon vaseux :

- Le bouchon vaseux est positionné à l'aval de Fatouville en période de crue et jusqu'à Tancarville en période d'étiage.
- Évolution des concentrations en MES dans le secteur aval de l'estuaire, avec une diminution d'une centaine de mg/l sur la période 2016-2022 à Balise A et une augmentation d'une centaine de mg/l à Tancarville, sur la période 2015-2022. Cette évolution est liée à la **migration du bouchon vaseux d'environ 1,5 km vers l'amont de l'estuaire entre 2016 et 2022.**

### Température de l'eau



### Sur la température de l'eau :

- Un gradient longitudinal est observé, avec des températures estivales jusqu'à 2°C plus élevées à l'amont par rapport à l'embouchure et 1,5°C plus faible en hiver.
- Une augmentation globale de la température est observée. **La température de l'eau estivale à Oissel a augmenté de 0.54°C entre 2012 et 2022.**

### Oxygénation de l'eau



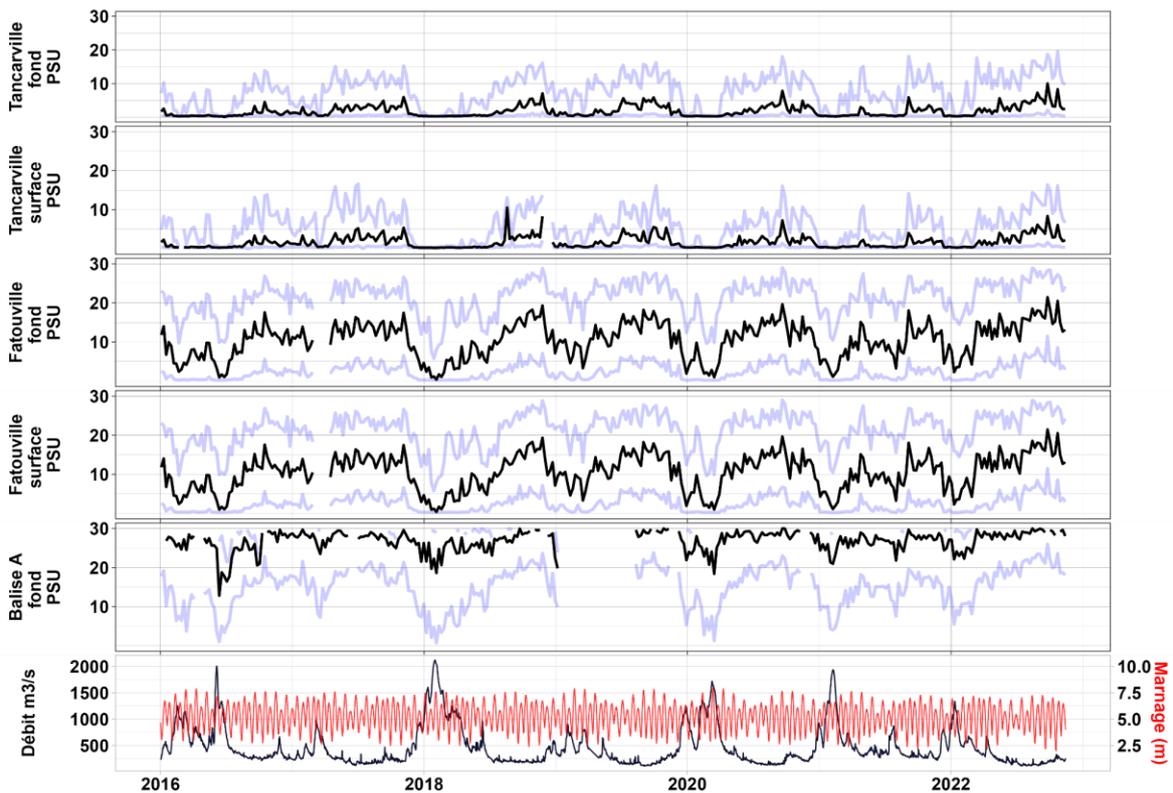
### Sur l'oxygénation de l'eau :

- Présence d'un gradient longitudinal avec des concentrations en oxygène dissous plus élevées dans la partie amont de l'estuaire (+0.5 à +2 mg/l selon les années).
- Présence d'un gradient vertical avec une oxygénation plus élevée en surface qu'en profondeur.
- **Très peu de valeurs inférieures au seuil sensible de 5 mg/l** (au maximum, 1.5% du temps en 2019 à Tancarville avec des épisodes d'une durée moyenne de 1.4 heures et maximale de 6 heures).
- Tendance à la diminution des plus faibles concentrations sur les mesures de fond à Tancarville, avec -0.8 mg/l entre 2014 et 2022 (rapprochement du seuil de 5 mg/l à surveiller dans les années à venir, qui pourrait ultérieurement être mis au regard de l'analyse de la fluorescence dans ce secteur).

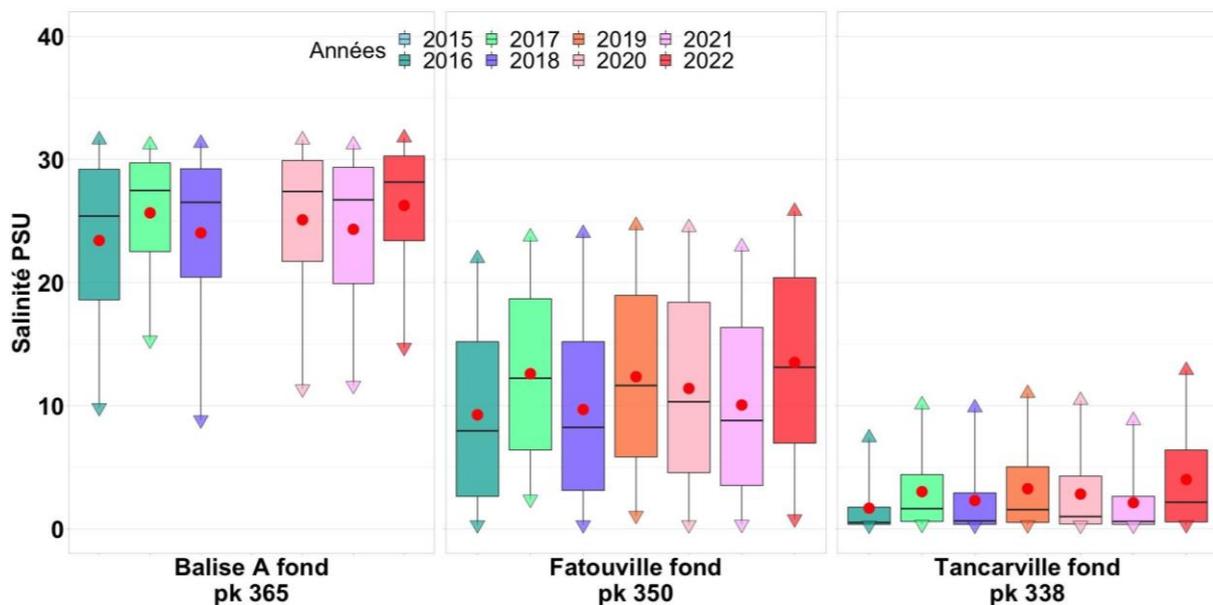
Ces observations montrent une évolution des conditions physico-chimiques de l'estuaire cohérente avec les trajectoires induites par le changement climatique. Si elles se confirment et se renforcent, ces évolutions modifieront significativement le fonctionnement de l'estuaire de la Seine. L'évolution du positionnement du bouchon vaseux et du gradient de salinité, l'augmentation des niveaux d'eau et la hausse des températures de l'eau sont autant de paramètres qui modifieront les caractéristiques des habitats naturels et les capacités d'accueil pour la faune et la flore estuarienne. 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. Les pressions thermiques et chimiques exercées sur les organismes aquatiques pourraient en être renforcées, avec des effets probables sur l'état de santé de ces derniers. Pour les activités humaines qui dépendent plus ou moins directement du fonctionnement de l'estuaire (e.g. navigation, pêche, industrie, habitation), des impacts sont également à attendre et à anticiper pour préserver un estuaire fonctionnel et résilient dans un contexte de changement climatique.

Ces constats soulignent l'intérêt de la mise en place d'un réseau de mesure haute fréquence sur un estuaire, tel que le réseau SYNAPSES en Seine. Ces 10 premières années de mesure font déjà ressortir une évolution des différents paramètres mesurés, avec notamment plusieurs points de vigilance sur les débits, la température, l'oxygénation, la salinité et la dynamique des MES. La poursuite de l'acquisition de données par le réseau SYNAPSES va permettre de consolider ces observations sur le plus long terme.

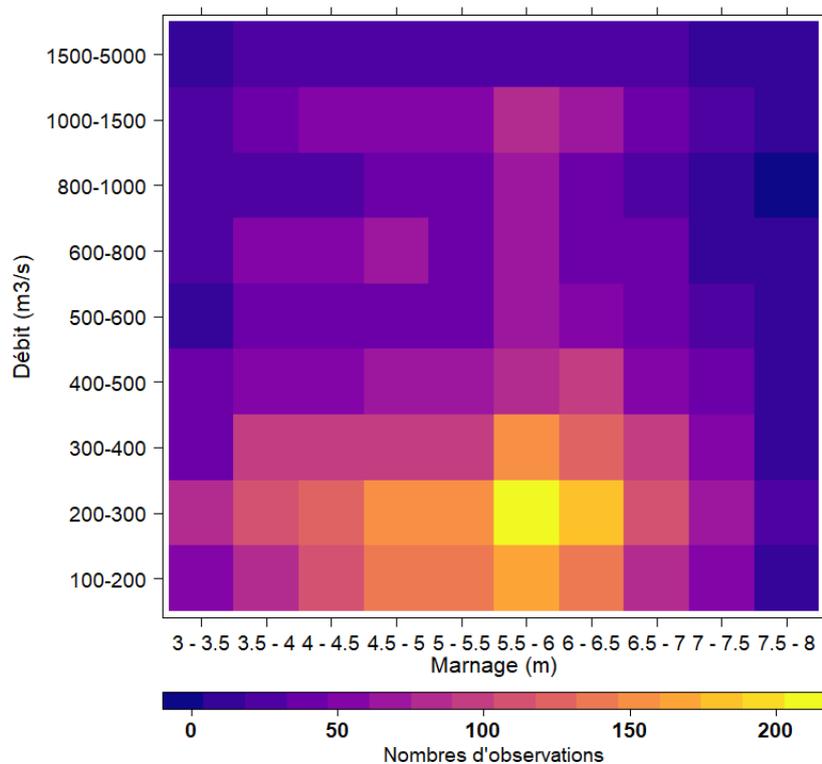
# Annexes



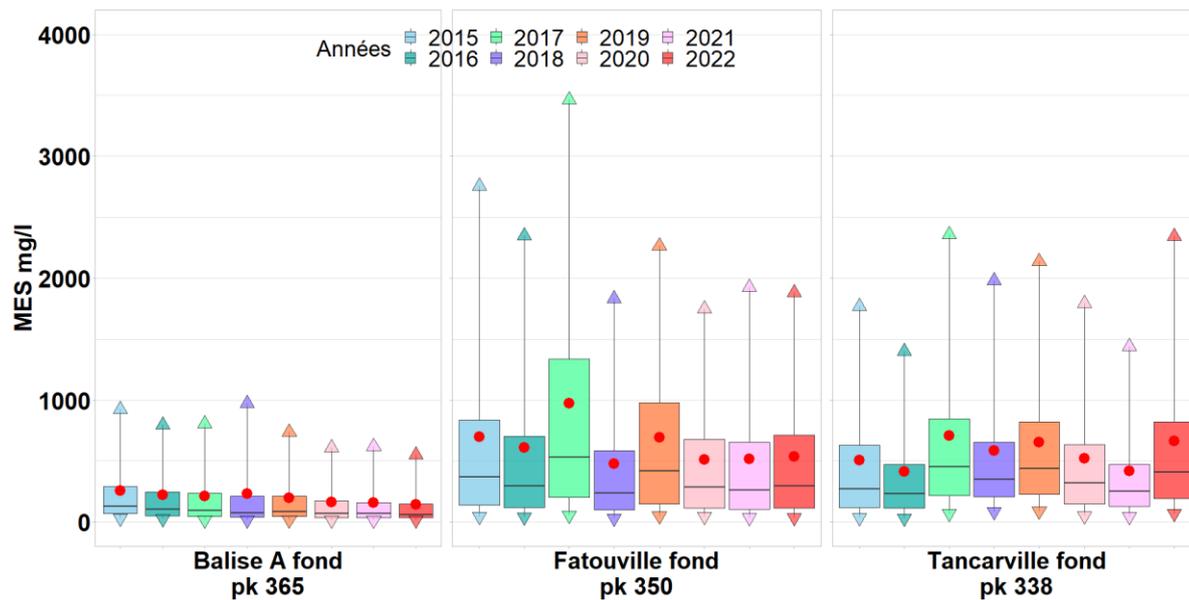
Annexe 1 : Evolution des mesures de salinité PSU (médianes / semaines), dans la partie aval de l'estuaire. Les enveloppes bleu clair représentent les percentiles 5 et 95 calculés par semaine. Les séries temporelles du débit à Vernon et du marnage au Havre sont également ajoutées.



Annexe 2 : Diagrammes en boîte des mesures de salinité (PSU), dans le secteur aval (Balise A, Fatouville, Tancarville) (les lignes horizontales dans les boîtes représentent la médiane annuelle, les triangles représentent les percentiles 5 et 95, les points rouges représentent les moyennes). Pour chaque station, les boîtes à moustache représentent une année civile de mesure complète.



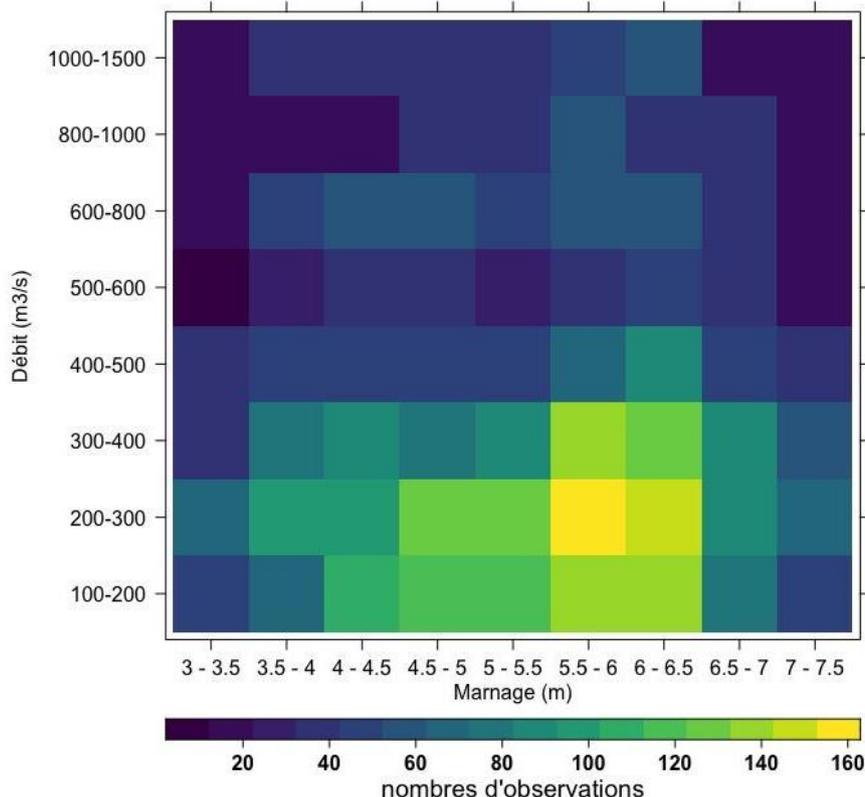
Annexe 3 : Carte de chaleur représentant le nombre d'observations utilisées pour calculer le positionnement moyen des 6 dernières années en PK du front de salinité 1 PSU par classe de débit et de marnage.



Annexe 4 : Diagrammes en boîte des concentrations en MES (mg/l), dans le secteur aval (Balise A, Fatouville, Tancarville) (les lignes horizontales dans les boîtes représentent la médiane annuelle, les triangles représentent les percentiles 5 et 95, les points rouges représentent les moyennes). Pour chaque station, les boîtes à moustache représentent une année civile de mesure complète.

**Annexe 5 : Statistiques saisonnières des [MES] mg/l (les P5 et P95 correspondent aux percentiles 5 et 95 calculés pour chacune des saisons).**

Saisons	Baïse A fond			Fatouville fond			Fatouville surface			Tancarville fond			Tancarville surface			Val-des-Loeux surface			Rouen surface		
	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95
Été 2011	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Été 2012	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Été 2013	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Été 2014	/	/	/	29.04	576.04	2410.32	14.52	368.15	1785.96	77.44	435.04	1074.48	43.56	252.98	644.33	4.84	14.25	31.46	3.63	7.52	12.10
Été 2015	24.20	158.94	498.52	24.20	538.48	1816.21	29.04	483.80	1616.56	43.56	584.46	1660.12	106.48	708.34	1208.79	10.89	26.43	60.50	10.89	28.16	107.69
Été 2016	24.20	171.47	677.60	33.88	324.83	982.52	48.40	592.57	2671.68	62.92	367.41	1040.60	9.68	224.87	779.24	4.84	15.52	31.46	4.84	11.65	27.83
Été 2017	9.68	131.26	484	43.56	892.85	3489.64	43.56	551.78	1882.76	77.44	585.15	1640.76	62.92	451.81	1142.24	10.89	24.80	47.19	7.26	14.05	22.99
Été 2018	9.68	217.29	711.48	29.04	361.60	1316.48	29.04	326.04	1210.00	72.60	425.04	1050.28	58.08	347.50	948.64	13.31	31.79	67.76	10.89	31.12	71.39
Été 2019	17.42	144.75	531.43	43.56	440.66	1332.94	34.85	328.52	958.32	165.53	689.62	1820.81	60.98	406.93	984.46	4.84	37.81	105.27	6.05	13.81	26.62
Été 2020	8.71	129.57	470.45	34.85	437.01	1324.22	26.14	341.44	1219.68	104.54	577.53	1655.28	52.27	404.59	993.17	1.21	9.69	30.25	7.26	11.33	19.36
Été 2021	8.71	100.74	392.04	26.14	374.68	1428.77	26.14	269.18	1001.88	34.85	345.86	1080.29	26.14	198.29	635.98	3.63	10.37	21.78	4.84	11.86	33.88
Été 2022	17.42	91.16	339.77	26.14	362.34	1176.12	26.14	270.34	993.17	87.12	664.92	2178.00	52.27	366.65	958.32	8.71	25.13	65.34	6.53	13.87	26.14
Hiver 2011	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Hiver 2012	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Hiver 2013	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Hiver 2014	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Hiver 2015	38.72	305.89	1121.67	48.40	642.50	2792.68	77.44	650.65	2691.04	24.20	159.86	396.88	27.83	109.94	271.58	15.73	36.54	66.25	19.36	44.36	83.49
Hiver 2016	43.56	304.16	1093.84	77.44	802.49	2821.72	72.60	706.37	2613.60	38.72	381.56	1176.12	38.72	316.25	948.64	7.26	24.20	60.50	12.10	65.87	227.48
Hiver 2017	43.56	303.84	1098.68	53.24	1065.04	3813.68	58.08	851.65	3175.04	62.92	928.60	3513.84	53.24	810.14	2613.60	4.84	14.45	39.93	7.26	42.23	128.38
Hiver 2018	24.20	322.83	1451.76	43.56	378.91	1219.68	43.56	276.12	856.68	53.24	186.27	319.44	24.20	99.70	222.64	16.94	45.97	101.64	18.15	54.71	131.89
Hiver 2019	24.20	244.78	972.84	69.70	899.51	2848.82	52.27	633.34	2230.27	69.70	561.04	2143.15	60.98	351.01	1019.30	10.89	24.55	52.03	8.47	21.28	52.03
Hiver 2020	26.14	200.32	845.06	45.68	396.97	1298.09	34.85	279.07	879.91	34.85	154.69	357.19	34.85	136.57	304.92	2.42	41.55	98.01	14.52	49.44	104.06
Hiver 2021	17.42	184.37	679.54	43.56	472.55	1611.72	34.85	307.04	1019.30	43.56	166.10	383.33	43.56	154.02	331.06	4.84	35.13	83.49	14.52	59.51	123.42
Hiver 2022	17.42	179.43	688.25	52.27	501.31	1824.63	34.85	366.50	1298.09	43.56	257.82	836.35	43.56	178.87	435.60	6.53	18.12	37.51	8.49	16.72	30.49
Printemps 2011	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Printemps 2012	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Printemps 2013	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Printemps 2014	/	/	/	38.72	528.70	1687.22	/	/	/	48.40	345.35	922.26	25.41	186.92	498.52	7.26	13.99	24.20	4.84	10.38	16.94
Printemps 2015	33.88	278.22	1055.12	53.24	749.80	3398.16	58.08	737.21	3155.68	24.20	310.40	1026.08	37.51	270.48	1001.64	7.26	16.06	32.67	6.08	20.10	44.77
Printemps 2016	19.36	159.88	609.84	33.88	515.34	2119.92	33.88	405.01	1655.28	14.52	161.17	440.44	19.36	163.93	450.12	6.05	16.98	39.93	7.26	22.27	58.08
Printemps 2017	14.52	197.96	779.24	82.28	1023.74	3407.36	29.04	487.25	1858.56	53.24	582.90	1655.28	58.08	736.10	2662.00	6.05	15.80	33.88	8.47	37.52	104.06
Printemps 2018	19.36	211.09	793.76	24.20	371.24	1282.60	33.88	318.44	1016.40	91.96	355.93	788.92	33.88	176.36	440.44	14.52	59.35	235.95	6.08	19.96	35.09
Printemps 2019	17.42	193.59	757.65	52.27	669.51	2090.88	43.56	463.48	1637.86	69.70	542.14	1733.69	52.27	347.51	932.18	2.42	31.81	75.02	9.68	12.53	33.88
Printemps 2020	17.42	157.35	601.13	43.56	531.78	1942.78	26.14	350.95	1219.68	43.56	409.66	1237.10	34.85	257.08	714.38	2.42	14.78	31.46	8.47	13.92	26.62
Printemps 2021	17.42	150.66	592.42	34.85	553.62	2047.32	26.14	373.48	1411.34	60.98	447.57	1202.26	34.85	250.61	688.25	4.84	11.14	20.57	/	/	/
Printemps 2022	17.42	146.33	601.13	43.56	631.48	2090.88	34.85	454.98	1742.40	95.83	695.57	2160.58	78.41	417.02	1036.73	4.36	12.45	23.96	6.53	11.06	19.60
Automne 2011	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Automne 2012	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Automne 2013	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Automne 2014	/	/	/	38.72	711.60	2487.76	58.08	731.15	2463.56	38.72	442.71	1282.60	25.41	241.69	676.39	7.26	14.63	27.83	2.42	11.67	24.20
Automne 2015	24.20	266.64	909.92	58.08	876.49	2981.44	4.84	758.94	2894.32	121.00	923.28	2691.04	101.64	733.24	2008.60	7.26	19.58	45.98	6.05	45.82	182.71
Automne 2016	24.20	233.48	794.49	33.88	757.21	2739.44	33.88	677.09	2550.68	82.28	813.41	2623.28	101.64	731.61	2400.64	6.05	14.42	30.25	4.84	11.61	24.20
Automne 2017	9.68	204.97	788.92	48.40	916.33	3160.52	33.88	765.84	2971.76	72.60	703.15	2381.28	72.60	505.81	1360.04	24.20	39.73	65.34	7.26	20.28	58.08
Automne 2018	4.84	124.06	464.64	43.56	818.23	2662.00	29.04	688.77	2369.66	130.68	1113.66	3336.70	104.54	921.69	2352.24	12.10	31.01	81.07	7.26	13.99	26.62
Automne 2019	17.42	162.39	609.84	52.27	769.63	2334.82	43.56	576.35	2003.76	95.83	831.75	2909.81	69.70	477.22	1254.53	2.42	26.01	72.60	7.26	17.46	45.98
Automne 2020	26.14	167.73	618.55	43.56	695.39	2212.85	34.85	607.38	2047.32	148.10	958.15	2887.16	78.41	540.18	1341.65	2.42	25.80	65.34	7.14	14.02	27.83
Automne 2021	17.42	196.94	792.79	34.85	672.15	2221.56	26.14	530.42	2003.76	60.98	716.62	2552.62	43.56	409.85	1149.98	4.84	12.36	18.15	8.47	11.17	14.52
Automne 2022	17.42	148.61	522.72	34.85	659.82	2143.15	34.85	563.85	2021.18	121.97	1027.81	3258.29	69.70	535.68	1306.80	8.71	23.37	58.59	10.89	19.53	28.31



**Annexe 6 : Carte de chaleur représentant le nombre d'observations utilisées pour calculer le positionnement moyen des 6 dernières années en PK du bouchon vaseux par classe de débit et de marnage.**

**Annexe 7 : Statistiques saisonnières des mesures de température en °C (les P5 et P95 correspondent aux percentiles 5 et 95 calculés pour chacune des saisons, et les pourcentages permettent de quantifier la part des mesures supérieures à 23 °C).**

Saisons	Balise A fond				Fatouville fond				Tancarville fond				Rouen surface			
	P5	Moyenne	P95	% > 23 °C	P5	Moyenne	P95	% > 23 °C	P5	Moyenne	P95	% > 23 °C	P5	Moyenne	P95	% > 23 °C
Été 2016	19,00	19,83	21,00	0,00	18,40	20,37	22,00	0,00	19,00	21,15	22,00	0,00	/	/	/	/
Été 2017	16,80	19,19	20,70	0,00	17,20	20,02	22,00	0,10	17,80	20,72	22,90	3,10	/	/	/	/
Été 2018	17,10	19,87	21,80	0,10	18,70	20,91	23,20	7,60	19,20	21,85	23,90	30,60	20,10	22,90	25,20	51,40
Été 2019	17,60	19,47	21,10	0,00	18,40	20,54	22,60	1,40	19,10	21,42	23,40	10,80	19,00	22,17	24,40	42,70
Été 2020	18,20	19,70	21,70	0,00	19,00	20,37	22,60	0,60	19,70	21,13	23,30	8,80	20,00	21,76	24,60	17,20
Été 2021	17,00	18,94	20,20	0,00	18,80	20,09	21,70	0,00	19,90	20,86	22,20	0,00	19,70	20,92	22,30	0,90
Été 2022	18,80	20,72	22,10	0,00	19,40	21,51	23,00	4,10	20,40	22,34	23,80	31,50	20,10	22,98	24,90	54,30
Hiver 2016	7,00	8,36	11,00	0,00	6,60	7,93	10,00	0,00	6,00	7,76	10,00	0,00	/	/	/	/
Hiver 2017	6,00	7,04	9,00	0,00	4,80	6,21	7,80	0,00	4,00	5,96	8,00	0,00	/	/	/	/
Hiver 2018	5,20	7,45	8,70	0,00	4,40	6,85	8,70	0,00	3,90	6,74	8,90	0,00	3,20	6,26	10,20	0,00
Hiver 2019	6,10	7,86	9,20	0,00	5,60	7,54	9,40	0,00	5,30	7,41	9,70	0,00	5,20	7,59	9,90	0,00
Hiver 2020	8,00	8,67	9,40	0,00	7,40	8,35	9,70	0,00	7,10	8,26	9,80	0,00	6,60	8,29	10,30	0,00
Hiver 2021	6,20	7,84	9,30	0,00	4,90	7,36	9,20	0,00	4,20	7,23	9,60	0,00	3,60	7,12	10,00	0,00
Hiver 2022	7,00	8,42	9,50	0,00	5,80	7,82	9,20	0,00	5,30	7,64	9,20	0,00	5,20	7,82	9,60	0,00
Printemps 2016	8,00	11,30	15,00	0,00	8,30	13,43	18,20	0,00	8,00	13,94	18,00	0,00	/	/	/	/
Printemps 2017	12,09	15,61	19,00	0,00	12,40	15,72	20,40	0,00	13,76	17,97	21,70	0,20	/	/	/	/
Printemps 2018	7,60	12,06	17,20	0,00	8,10	14,37	20,20	0,00	7,90	15,32	21,10	0,00	7,70	16,00	21,60	0,00
Printemps 2019	9,50	12,91	16,90	0,00	10,00	13,86	18,10	0,00	10,20	14,58	18,80	0,00	10,50	15,39	20,20	0,00
Printemps 2020	9,20	13,25	17,20	0,00	9,90	14,61	18,80	0,00	10,20	15,57	19,80	0,00	9,80	16,27	20,80	0,00
Printemps 2021	9,00	12,27	18,20	0,00	9,10	13,32	20,00	0,00	9,40	14,14	21,30	0,00	13,60	16,89	23,40	6,80
Printemps 2022	9,10	13,47	18,30	0,00	9,50	14,53	19,60	0,00	10,00	15,33	20,50	0,00	10,50	16,52	22,00	3,00
Automne 2016	9,00	13,18	19,00	0,00	7,70	12,64	19,20	0,00	7,00	12,58	20,00	0,00	/	/	/	/
Automne 2017	7,50	12,25	16,50	0,00	6,60	12,84	17,30	0,00	6,20	12,88	17,40	0,00	/	/	/	/
Automne 2018	8,80	13,18	17,50	0,00	8,40	12,96	17,30	0,00	8,40	12,96	17,50	0,00	7,30	12,04	17,10	0,00
Automne 2019	8,60	13,72	17,60	0,00	7,80	12,47	17,30	0,00	7,60	12,73	18,10	0,00	7,50	12,46	18,30	0,00
Automne 2020	9,10	13,43	17,30	0,00	8,80	13,17	17,50	0,00	8,50	13,06	18,30	0,00	8,00	12,73	18,10	0,00
Automne 2021	8,10	13,26	18,60	0,00	7,10	12,81	18,90	0,00	7,00	12,72	19,50	0,00	6,90	11,67	19,30	0,00
Automne 2022	9,10	14,15	17,60	0,00	8,20	13,89	17,60	0,00	8,10	13,98	18,10	0,00	6,80	13,38	17,40	0,00

**Annexe 8 : Statistiques saisonnières des mesures d'oxygène dissous mg/l (les P5 et P95 correspondent aux percentiles 5 et 95 calculés pour chacune des saisons, et les pourcentages permettent de quantifier la part des mesures inférieures à 5 mg/l, seuil sensible pour la faune aquatique).**

Saisons	Balise A fond			Fatouville fond			Fatouville surface			Tancarville fond			Tancarville surface			Val-des-Leux surface			Rouen surface		
	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95	P5	Moyenne	P95
Été 2012	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	6,00	7,63	9,10	5,90	6,61	7,20	6,30	7,10	7,90
Été 2013	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	6,10	7,58	9,40	6,00	7,07	7,80	6,70	7,73	8,50
Été 2014	/	/	/	5,90	6,96	7,90	6,10	7,24	8,30	6,10	7,99	9,60	5,80	7,31	8,60	6,10	7,12	8,40	6,60	7,56	8,70
Été 2015	6,40	7,33	8,80	5,60	6,75	7,60	6,10	7,29	8,70	5,30	7,09	8,90	5,40	7,05	8,80	5,40	6,60	7,80	6,10	6,99	8,00
Été 2016	6,00	7,02	8,50	6,20	7,36	8,50	6,80	7,82	9,30	6,60	8,20	10,00	6,70	8,17	10,10	6,30	7,54	8,30	6,90	8,23	9,10
Été 2017	6,60	7,30	8,00	6,10	6,92	7,80	6,00	7,14	8,00	6,20	7,28	8,20	5,60	7,08	8,30	6,30	7,39	8,30	7,10	8,20	9,30
Été 2018	5,50	6,67	8,00	5,80	7,15	8,30	5,70	6,86	7,90	5,40	6,96	8,00	5,70	7,31	8,80	6,40	7,56	9,80	7,30	8,33	10,20
Été 2019	6,10	7,12	7,70	5,20	6,59	7,30	/	/	5,00	7,07	9,00	5,70	7,40	9,00	6,30	7,74	10,00	6,80	7,57	8,40	
Été 2020	6,10	7,07	8,30	5,90	7,00	8,20	6,00	7,17	8,20	5,80	7,60	10,00	6,40	8,03	10,20	7,40	9,38	11,50	6,40	7,81	8,80
Été 2021	6,10	7,03	8,20	6,10	7,10	8,40	6,10	7,21	8,50	5,50	7,64	9,30	6,70	8,22	9,80	7,60	8,61	10,00	7,20	8,18	8,80
Été 2022	6,00	7,04	8,20	5,70	6,87	7,90	5,60	6,84	7,90	5,10	6,56	7,60	5,40	6,80	7,70	6,10	6,83	7,80	7,00	7,52	8,30
Hiver 2012	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	9,80	11,25	12,60	9,90	10,64	12,80	10,40	12,23	14,20
Hiver 2013	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	10,30	11,34	12,40	10,70	11,73	12,80	10,60	12,24	13,60
Hiver 2014	/	/	/	9,80	9,89	9,95	/	/	/	/	/	/	10,00	10,71	11,90	10,90	11,63	12,20	10,80	11,71	12,50
Hiver 2015	9,20	9,92	10,90	9,80	10,87	11,90	10,40	11,59	12,70	10,70	11,76	12,90	10,40	11,41	12,40	11,00	11,85	12,80	11,50	12,67	14,10
Hiver 2016	9,20	9,91	10,90	9,20	11,40	12,40	9,10	10,29	11,30	8,50	10,30	11,40	9,20	10,99	12,40	9,80	11,10	12,70	10,20	11,63	12,50
Hiver 2017	9,20	9,68	10,20	9,80	10,40	11,00	9,30	10,19	10,80	10,70	11,44	12,30	10,20	11,14	12,00	10,60	12,33	14,20	10,50	11,73	13,40
Hiver 2018	9,10	9,85	10,90	9,90	10,88	12,00	10,00	11,00	11,90	10,10	11,24	12,60	10,10	11,34	12,70	10,50	11,76	13,10	10,70	11,91	13,10
Hiver 2019	9,40	10,56	11,50	9,40	10,86	12,40	9,70	11,00	12,30	10,40	11,37	12,40	10,70	11,52	12,60	10,80	11,68	12,50	10,90	11,85	12,70
Hiver 2020	9,40	10,15	11,00	9,90	10,71	11,40	10,00	10,85	11,60	10,00	11,04	11,90	10,20	11,25	12,10	10,00	11,23	12,20	10,40	12,42	13,70
Hiver 2021	9,00	9,91	11,00	9,60	10,60	11,80	10,20	11,21	12,60	9,80	11,09	12,60	9,90	11,21	12,50	10,30	11,65	13,10	10,20	11,70	12,90
Hiver 2022	9,10	9,72	10,70	9,50	10,51	11,80	9,90	10,76	12,00	9,90	10,97	12,10	10,10	11,08	12,00	10,20	11,90	13,20	10,70	12,26	13,40
Printemps 2012	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	7,40	8,37	9,30	6,30	8,33	9,60	6,80	8,60	10,20
Printemps 2013	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	8,10	9,35	10,70	7,70	9,58	11,40	8,00	9,83	12,00
Printemps 2014	/	/	/	/	/	/	/	/	7,30	9,04	10,50	6,90	8,48	9,90	6,50	8,58	10,70	6,80	8,88	10,80	
Printemps 2015	7,50	8,85	9,90	8,30	9,15	10,30	7,90	9,13	10,80	7,80	9,16	10,80	7,70	9,05	10,60	7,40	9,41	11,10	8,00	9,50	11,10
Printemps 2016	8,00	9,08	9,90	7,20	8,76	10,10	6,70	8,83	10,60	7,00	8,87	10,80	7,30	9,64	11,80	7,20	8,95	10,90	7,70	9,69	11,50
Printemps 2017	7,70	8,93	9,90	6,60	7,94	9,00	6,70	8,26	9,90	/	/	6,20	7,95	9,10	6,90	8,78	10,70	6,60	8,54	10,70	
Printemps 2018	6,90	8,66	10,00	7,60	8,96	10,60	7,30	8,58	10,50	6,60	8,75	11,10	7,40	9,27	11,30	6,60	9,07	11,50	7,70	9,61	11,60
Printemps 2019	8,30	9,67	10,70	8,10	8,90	9,60	8,20	9,27	10,20	7,40	9,31	10,80	7,80	9,52	10,90	7,50	9,18	11,00	7,70	9,35	11,10
Printemps 2020	7,60	9,14	10,20	7,70	8,87	10,40	7,50	8,56	10,20	7,10	9,08	10,80	7,70	9,50	11,20	8,20	9,82	11,30	7,80	9,26	11,20
Printemps 2021	7,10	8,83	10,40	8,20	9,23	10,20	8,10	9,31	10,60	7,80	10,36	11,90	9,50	10,95	12,20	8,40	10,25	11,50	7,70	9,53	11,50
Printemps 2022	7,40	8,64	9,70	7,10	8,34	9,60	6,80	8,48	10,00	6,20	8,13	9,90	6,50	8,31	10,10	7,00	8,75	11,10	7,30	8,92	10,90
Automne 2012	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	7,10	8,69	10,30	6,70	9,23	11,80	7,10	9,59	11,90
Automne 2013	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	6,00	9,38	11,90	6,10	9,82	12,60	6,50	9,68	12,90
Automne 2014	8,30	9,10	9,90	7,20	8,41																

Annexe 9 : Statistiques des hauteurs d'eau sur les années hydrologiques à Balise A (cm).

Année hydrologique	p5	p25	p50	p75	p95
1984 / 1985	158	289	514	692	785
1985 / 1986	179	307	511	667	760
1986 / 1987	167	298	511	672	770
1987 / 1988	174	306	514	673	772
1988 / 1989	174	303	513	674	767
1989 / 1990	186	322	525	683	787
1990 / 1991	148	279	499	671	770
1991 / 1992	161	291	510	675	771
1992 / 1993	154	284	505	678	772
1993 / 1994	151	283	509	680	779
1994 / 1995	154	278	511	686	786
1995 / 1996	161	287	512	687	786
1996 / 1997	158	286	509	680	777
1997 / 1998	161	297	513	686	778
1998 / 1999	163	299	516	688	782
1999 / 2000	165	300	516	685	779
2000 / 2001	176	311	522	686	784
2001 / 2002	170	305	516	683	776
2002 / 2003	180	313	522	686	784
2003 / 2004	182	312	518	683	783
2004 / 2005	180	313	516	679	778
2005 / 2006	183	310	516	679	775
2006 / 2007	184	318	523	686	784
2007 / 2008	180	312	519	682	782
2008 / 2009	175	311	515	678	780
2009 / 2010	175	304	513	679	779
2010 / 2011	168	302	515	682	775
2011 / 2012	165	299	512	682	774
2012 / 2013	181	308	520	690	790
2013 / 2014	169	300	521	693	786
2014 / 2015	164	297	517	690	785
2015 / 2016	171	300	518	692	786
2016 / 2017	169	298	516	687	786
2017 / 2018	170	299	520	692	788
2018 / 2019	176	304	520	688	786
2019 / 2020	181	312	524	690	790
2020 / 2021	184	317	528	694	788
2021 / 2022	184	315	526	692	791

*Annexe 10 : Statistiques des hauteurs d'eau sur les années hydrologiques à Fatouville (cm).*

Année hydrologique	p5	p25	p50	p75	p95
1995 / 1996	192	295	509	685	778
1996 / 1997	190	295	520	695	788
1997 / 1998	191	300	522	698	787
1998 / 1999	193	300	523	697	790
1999 / 2000	199	307	529	699	792
2000 / 2001	216	320	537	704	799
2001 / 2002	201	312	531	701	790
2002 / 2003	207	315	527	694	792
2003 / 2004	208	315	519	685	785
2004 / 2005	204	314	517	681	778
2005 / 2006	212	318	520	682	778
2006 / 2007	215	326	530	693	791
2007 / 2008	211	321	529	691	790
2008 / 2009	210	321	521	685	786
2009 / 2010	214	320	521	688	785
2010 / 2011	202	313	517	689	783
2011 / 2012	197	307	512	691	782
2012 / 2013	196	307	528	701	798
2013 / 2014	195	307	532	708	800
2014 / 2015	186	304	528	702	793
2015 / 2016	191	306	531	705	797
2016 / 2017	193	306	524	696	794
2017 / 2018	189	304	531	703	798
2018 / 2019	199	313	529	699	795
2019 / 2020	201	318	536	702	801
2020 / 2021	198	317	533	702	794
2021 / 2022	197	316	529	696	795

Annexe 11 : Statistiques des hauteurs d'eau sur les années hydrologiques à Tancarville (cm).

Année hydrologique	p5	p25	p50	p75	p95
1987 / 1988	282	364	540	693	797
1988 / 1989	259	343	526	687	780
1989 / 1990	244	335	530	691	787
1990 / 1991	237	323	525	690	786
1991 / 1992	244	328	534	699	793
1992 / 1993	249	334	530	697	789
1993 / 1994	265	350	542	707	800
1994 / 1995	267	353	544	709	808
1995 / 1996	235	322	532	708	803
1996 / 1997	247	332	540	710	801
1997 / 1998	248	336	539	710	799
1998 / 1999	257	344	541	710	804
1999 / 2000	260	346	541	708	802
2000 / 2001	288	374	557	715	810
2001 / 2002	261	352	544	706	793
2002 / 2003	248	340	539	704	801
2003 / 2004	227	323	527	695	795
2004 / 2005	230	323	523	689	785
2005 / 2006	231	324	525	690	784
2006 / 2007	240	335	533	697	796
2007 / 2008	244	338	531	695	794
2008 / 2009	235	330	527	692	791
2009 / 2010	235	328	533	701	798
2010 / 2011	222	322	528	698	792
2011 / 2012	220	320	530	701	792
2012 / 2013	241	334	539	706	804
2013 / 2014	239	333	541	715	806
2014 / 2015	227	325	537	711	803
2015 / 2016	233	330	542	714	806
2016 / 2017	218	317	534	706	803
2017 / 2018	235	331	542	712	807
2018 / 2019	228	324	538	706	802
2019 / 2020	238	336	545	709	807
2020 / 2021	234	332	542	709	801
2021 / 2022	226	327	537	703	801

*Annexe 12 : Statistiques des hauteurs d'eau sur les années hydrologiques à Val-des-Leux (cm).*

1992 / 1993	458	534	609	677	757
1993 / 1994	469	565	643	717	818
1994 / 1995	477	567	643	712	813
1995 / 1996	445	520	598	668	746
1996 / 1997	453	532	608	678	759
1997 / 1998	460	544	621	693	772
1998 / 1999	469	557	635	706	793
1999 / 2000	476	559	637	708	792
2000 / 2001	538	612	689	759	840
2001 / 2002	511	569	646	712	757
2002 / 2003	443	516	595	665	744
2003 / 2004	442	521	602	675	762
2004 / 2005	445	519	598	668	749
2005 / 2006	440	519	599	670	753
2006 / 2007	459	539	618	688	772
2007 / 2008	462	542	620	690	774
2008 / 2009	445	522	601	671	754
2009 / 2010	443	524	604	677	761
2010 / 2011	443	528	609	683	769
2011 / 2012	447	530	611	684	765
2012 / 2013	474	559	639	712	796
2013 / 2014	466	555	636	709	795
2014 / 2015	460	544	627	700	783
2015 / 2016	464	551	635	708	794
2016 / 2017	440	520	604	678	761
2017 / 2018	452	555	640	718	812
2018 / 2019	434	517	603	681	765
2019 / 2020	444	539	625	702	798
2020 / 2021	453	540	626	700	788
2021 / 2022	439	522	608	684	769

Annexe 13 : Statistiques des hauteurs d'eau sur les années hydrologiques à Rouen(cm).

Année hydrologique	p5	p25	p50	p75	p95
1984 / 1985	452	521	599	667	737
1985 / 1986	468	554	629	699	788
1986 / 1987	493	572	648	718	797
1987 / 1988	506	597	677	747	841
1988 / 1989	469	554	633	705	791
1989 / 1990	449	533	612	685	772
1990 / 1991	456	537	619	691	774
1991 / 1992	453	529	609	680	758
1992 / 1993	457	542	621	693	782
1993 / 1994	487	583	664	737	839
1994 / 1995	491	589	673	745	843
1995 / 1996	456	536	617	691	772
1996 / 1997	466	552	631	704	788
1997 / 1998	472	562	642	716	798
1998 / 1999	485	579	662	735	826
1999 / 2000	494	581	664	736	824
2000 / 2001	523	623	701	773	868
2001 / 2002	487	583	663	737	827
2002 / 2003	472	566	647	720	812
2003 / 2004	457	539	623	698	785
2004 / 2005	462	538	620	692	771
2005 / 2006	458	541	624	696	780
2006 / 2007	479	562	643	715	799
2007 / 2008	478	564	642	714	798
2008 / 2009	460	539	619	692	774
2009 / 2010	457	540	623	696	780
2010 / 2011	456	545	629	704	791
2011 / 2012	461	548	630	705	786
2012 / 2013	490	581	662	735	821
2013 / 2014	479	574	656	730	818
2014 / 2015	468	559	643	717	801
2015 / 2016	473	566	651	726	814
2016 / 2017	446	529	616	692	773
2017 / 2018	458	569	661	740	839
2018 / 2019	437	524	616	697	781
2019 / 2020	448	550	642	720	818
2020 / 2021	460	551	642	719	808
2021 / 2022	442	531	620	698	783

## Bibliographie

- Avoine J., Allen G.P., Nichols M., Salomon J.C., Larssonneur C., 1981. **Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France: Effect of man-made modifications on estuary—shelf sedimentology.** , 40(1-2), 119–137. doi:10.1016/0025-3227(81)90046-3
- Brenon I., Le Hir P., 1999. **Simulation du bouchon vaseux dans l'estuaire de la Seine: capacité et limites d'un modèle bidimensionnel horizontal.**,328(5),0–332. doi:10.1016/s1251-8050(99)80125-6
- Dupont J.P., Flipo N., Pennequin D., 2018. **Projet ECHANGES : Interaction entre les différentes masses d'eau estuariennes et bilan hydrique de l'estuaire.** Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5
- 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.
- Druine F., 2018. **Flux sédimentaire en estuaire de Seine : quantification et variabilité multi-échelle sur la base de mesure de turbidité (réseau SYNAPSES).** Sciences de la Terre. Normandie Université; Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
- Fisson C., 2017. **Impact de la crue de juin 2016 sur l'estuaire de la Seine.** Rapport réalisé par le GIP Seine-Aval, 36p.
- Fisson C. (coord.), 2014. **Qualité des eaux de l'estuaire de la Seine.** Fascicule Seine-Aval 3.2, 52p.
- Grasso F., Verney R., Le Hir P., Thouvenin B., Schulz E., Kervella Y., Garnier V., 2018. **Suspended sediment dynamics in the macrotidal Seine Estuary (France): 1. Numerical modeling of turbidity maximum dynamics.** Journal of Geophysical Research: Oceans, 123, 558– 577. <https://doi.org/10.1002/2017JC013185>
- Guérin S., Richoux R., Garcia-Gonzalez E., Azimi S., Rocher V., Lemoine J.P., Fisson C., Petit F., Mouchel J.M., 2019. **Fonctionnement dégradé de la station d'épuration Seine Aval (Yvelines) du 3 au 5 juillet 2019 suite à l'incendie de l'unité de clariflocculation – Analyse de l'impact environnemental de l'événement sur la Seine.** L'eau, L'industrie, Les nuisances n°424, 65-75 pp
- GIP Seine-Aval, 2008. **Niveaux d'oxygénation dans l'estuaire de la Seine.** Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution. 6p.
- GIP Seine-Aval, 2013. **La salinité dans l'estuaire de la Seine.** Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution. 6p.
- Harvey R., Lye L., Khan A., Paterson R., 2011. **The Influence of Air Temperature on Water Temperature and the Concentration of Dissolved Oxygen in Newfoundland Rivers.** Canadian Water Resources Journal, 36(2), 171–192. doi:10.4296/cwrj3602849
- Jardani A. (coord.), Dupont J.P., 2012. **Projet TIDEHYDREX : Forçages hydrologiques des aquifères du remplissage estuarien : un atelier expérimental pilote pour la prévision de l'influence des changements climatiques sur le fonctionnement hydrologique des zones humides.** Projet Seine-Aval 4, 136p.

- Le Hir P. (coord.) & Lafite R., 2012. **Projet MODEL : Modélisation validée de l'hydro-morpho-sédimentologie, base physique d'une modélisation environnementale de l'estuaire de la Seine**. *Projet Seine-Aval4*, 143p.
- Le Hir P., Ficht A., Silva Jacinto R., Lesueur P., Dupont J.P., Lafite R., Brenon I., Thouvenin B., Cugier P., 2001. **Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine estuary (France)**. *Estuaries*, 24(6), 950–963. doi:10.2307/1353009
- Lemoine J.P., 2021. **Dynamique morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine : rôle des dragages d'entretien**. *Océanographie*. Université de Bretagne occidentale - Brest. Français.
- Lemoine J.P. (coord.) & Verney R., 2015. **Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine**. *Fascicule Seine-Aval 3.3*, 64p.
- Morelle J., 2017. **Dynamique spatiale et temporelle de la production primaire de l'estuaire de la Seine**. Normandie Université,
- Rivière A., Ladet D., Thomas W., Le Breton G., Ducharme A., et al., 2021. **Projection des températures de l'eau de la Seine à Paris à l'horizon 2100**. *Rapport PIREN SEINE 2021*. hal-03533469
- Romana L.A., Thouvenin B., Galenne B., Casanova C., 1990. **Influence du bouchon vaseux sur les variations des concentrations en oxygène dissous : Cas de l'estuaire de la Loire**. *La Houille Blanche* Number 3-4, 257 - 263. <https://doi.org/10.1051/lhb/1990020>
- Romero E., Le Gendre R., Garnier J., Billen G., Fisson C., 2016. **Long-term water quality in the lower Seine: Lessons learned over 4 decades of monitoring**. *Environmental Science & Policy*, 58, pp.141-154.
- UNESCO, 1966. **International oceanographic tables**, Table I.
- Verney R., Grasso F., Druine F., Deloffre J., Lemoine J.P., 2017. **Using real time monitoring networks for investigating sediment dynamics in estuaries: a step beyond turbidity time series analysis**. *INTERCOH 2017- 14th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes*. November 13-17, 2017, Uruguay.

 POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

[www.seine-aval.fr](http://www.seine-aval.fr)

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

**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.

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

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

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

