



HAL
open science

Dynamique du coin salé et dynamique sédimentaire à l'embouchure du Rhône

Olivier Radakovitch, Romaric Verney, B. Camenen, Guillaume Dramais, Adrien Bonnefoy, Jérôme Le Coz, Patrick Boyer, Franck Giner

► **To cite this version:**

Olivier Radakovitch, Romaric Verney, B. Camenen, Guillaume Dramais, Adrien Bonnefoy, et al.. Dynamique du coin salé et dynamique sédimentaire à l'embouchure du Rhône. [Rapport de recherche] IRSN; Ifremer; INRAE. 2024, pp.1-34. hal-04652912

HAL Id: hal-04652912

<https://hal.science/hal-04652912v1>

Submitted on 26 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

Dynamique du coin salé et dynamique sédimentaire à l'embouchure du Rhône

Dynamique du coin salé et dynamique sédimentaire à l'embouchure du Rhône

Rapport scientifique final

Version du 11 avril 2024

Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action

Axe A – Comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire du fleuve

Action A4 – Dynamique du coin salé et dynamique sédimentaire à l'embouchure du Rhône

Personnes impliquées

Olivier Radakovitch (IRSN/LRTA) ; Romaric Verney (Ifremer, DYNECO/DHYSED) ; Benoit Camenen (INRAE/Riverly) ; Guillaume Dramais (INRAE/Riverly) ; Adrien Bonnefoy (INRAE/Riverly) ; Jérôme Le Coz (INRAE/Riverly) ; Patrick Boyer (IRSN/LRTA) ; Franck Giner (IRSN/LRTA).

Pour citer ce rapport

Radakovitch, O, Verney, R, Camenen, B, Dramais, Bonnefoy A., Le Coz J., Boyer P., Giner F. (2024). *Dynamique du coin salé et dynamique sédimentaire à l'embouchure du Rhône*. Rapport final. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. Action A.4. 33 p.

L'OSR est un programme animé par le Graie. Pour toute information vous pouvez contacter Bertrand Morandi (bertrand.morandi@graie.org)

Résumé

L'action A4 de l'OSR 6 portait sur la zone de l'estuaire du Rhône, où elle avait pour objectif de tester le couplage de méthodes de mesures optiques et acoustiques pour mieux caractériser les flux de MES sortant, ainsi que d'acquérir de nouvelles données pour caractériser la structure du coin salé.

La complémentarité des capteurs pour caractériser à la fois le spectre en classe de taille des agrégats en suspension, leur densité effective et la possible présence de sable en suspension est avérée. Ce couplage, particulièrement intéressant pour l'évaluation du sable au fond de la colonne d'eau, mériterait d'être testé sur une large gamme de débit, mais la mise en œuvre des instruments et moyens nautiques se révèle difficile et limitante pour le redéploiement d'un tel système.

Pour le coin salé les données des campagnes 2021 et 2022 viennent étayer les performances du modèle numérique DRACAR pour reproduire ce phénomène d'intrusion, qui se met en place à l'embouchure pour des débits entre 1500 et 1600 m³/s.

Mots-clés

Rhône ; Observatoire ; sédiment ; OSR ; coin salé ; sable/vase ; méthodes optiques et acoustiques

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| 1. Préambule | 5 |
| 2. Dynamique sédimentaire à l'embouchure..... | 5 |
| 2.1 Matériel et méthodes..... | 6 |
| 2.1.1 Site d'étude et conditions | 6 |
| 2.1.2 Capteurs et prélèvements..... | 7 |
| 2.2 Résultats | 8 |
| 2.2.1 Calibration des capteurs optiques | 8 |
| 2.2.2 Variabilité spatiale des concentrations en sédiment en suspension | 9 |
| 2.2.3 Distribution en classe de taille des sédiments en suspension..... | 10 |
| 2.2.4 Analyse de la densité des particules en suspension | 13 |
| 2.2.5 Apport d'un couplage optique/acoustique..... | 15 |
| 2.2.6 Jaugeage du débit du Rhône au PK320 par ADCP..... | 17 |
| 2.2.7 Estimation d'un flux solide au PK320 | 18 |
| 2.3 Synthèse | 20 |
| 3. Dynamique du coin salé..... | 21 |
| 3.1 Campagnes de terrain Coin salé 2021-2022..... | 22 |
| 3.2 Modèle DRACAR | 25 |
| 3.3 Profils de turbidité..... | 27 |
| 3.4 Synthèse | 29 |
| 4. Conclusion Générale..... | 30 |
| 5. Bibliographie..... | 31 |
| 6. Annexes | 33 |
| Annexe 1 – Profils verticaux des distributions en classe de taille issus des mesures LISST200X au PK320..... | 33 |

1. Préambule

Les programmes successifs de l'OSR ont permis d'observer, de consolider notre compréhension et de modéliser le fonctionnement hydraulique et hydrosédimentaire du système Rhône en amont de Beaucaire. Les études à l'aval de ce point ont été plus limitées, mais elles ont tout de même permis de travailler sur les transferts de sédiments sur le prodelta (Sabatier & Kulling 2015 ; Boudet 2017 ; Boudet et al 2017) et sur les flux de MES transitant au niveau du Bac de Barcarin grâce à l'installation d'un ADCP sur le bac (Radakovitch et al., 2014; Sakho et al 2017).

Dans cette zone le fleuve interagit avec le milieu marin directement en mer pour des débits supérieurs au module, ou dans la zone s'étendant sur 30 km en amont de l'embouchure pour des débits plus faibles. Cette transition eau douce/eau salée induit des processus hydrodynamiques et sédimentaires spécifiques et se traduit par la mise en place d'un coin salé et d'une stratification horizontale et verticale dynamique, impliquant la remontée vers l'amont des eaux marines près du fond. La position de ce coin salé est une préoccupation à prendre en compte pour les prélèvements d'eau agricole en surface du Rhône, et ce pour s'affranchir de pomper de l'eau salé. Elle a également un effet sur la salinisation des terres par les échanges fleuves-nappes. Ce gradient de salinité est aussi un facteur de contrôle des processus de floculation qui modifient les caractéristiques des matières en suspension (MES) et jouent sur le transfert et le dépôt des sédiments dans la zone du prodelta. Enfin, la proportion des flux exportés en mer entre sables et sédiments fins est très mal connue.

Pour mieux comprendre cet interface, l'action A4 avait pour objectif de : a) développer notre capacité à observer et quantifier les flux de MES dans cette zone clé à partir des méthodes récentes, et b) obtenir plus de données pour caractériser la structure du coin salé. Le premier objectif devait être réalisé lors d'épisodes de crues, mais ceci n'a pas pu se faire pour des contraintes logistiques, et une seule campagne à débit moyen a pu être conduite.

2. Dynamique sédimentaire à l'embouchure

Les équipes INRAE-Riverly et Ifremer/DHYSED possèdent une expérience complémentaire sur l'observation des MES sur différents systèmes aquatiques (Rhône amont, Estuaire et baie de Seine, Mékong ...) et ce à travers différentes technologies de capteurs optiques et acoustiques et de moyens de prélèvements (Chapalain et al., 2019 ; Dramais et al., 2018 ; Camenen et al, 2023 ; Verney, 2019, Verney et al., 2024). Cette action vise à explorer la complémentarité et les limites de ces techniques de mesures pour caractériser les sédiments en suspension à l'interface entre fleuve et mer.

Initialement, plusieurs campagnes mettant en œuvre le même protocole détaillé ci-dessous devaient être réalisées, afin de tester leur application sur une gamme étendue de conditions de débit. La première campagne s'est déroulée en décembre 2021, pour un débit de l'ordre de 2010 m³/s. Malheureusement, la difficulté d'anticiper et de mobiliser les moyens nautiques et les équipes (situées à Lyon et Brest) pour des événements de crue n'a pas permis de réaliser des campagnes complémentaires.

2.1 Matériel et méthodes

2.1.1 Site d'étude et conditions

Le site d'étude s'étend de Port Saint-Louis du Rhône jusqu'à la barre d'embouchure au niveau du prodelta (Figure 1). Deux stratégies complémentaires ont été appliquées :

- Une section du fleuve au droit de Port Saint-Louis (PK320), afin de qualifier la variabilité latérale des MES et de quantifier des flux liquides et solides. En plus d'un transect continu par ADCP, trois stations ponctuelles (RD, centre et RG) ont été réalisées pour effectuer des prélèvements (bouteille Niskin et bouteille de Delft) et des profils verticaux à l'aide d'une cage multi-instrumentée.
- Une section longitudinale, de Port Saint-Louis jusqu'à la barre d'embouchure dans le prodelta. Des stations ponctuelles ont été réalisées sur cette section afin d'obtenir des profils verticaux à l'aide des capteurs optiques et acoustiques (similaires aux stations sur la section transverse).



Figure 1. Cartographie des points de mesures réalisés en décembre 2021 dans la zone d'interface entre le Rhône et la mer.

Le moyen nautique Salmo de l'INRAE a été mobilisé pour réaliser les mesures (Figure 2). Il permet d'embarquer un pilote et 3 scientifiques. Il a été adapté de façon à pouvoir : 1) installer une perche soutenant un ADCP de coque à tribord et 2) déborder et faire profiler une cage instrumentée et les bouteilles de prélèvements à bâbord à l'aide d'une potence.

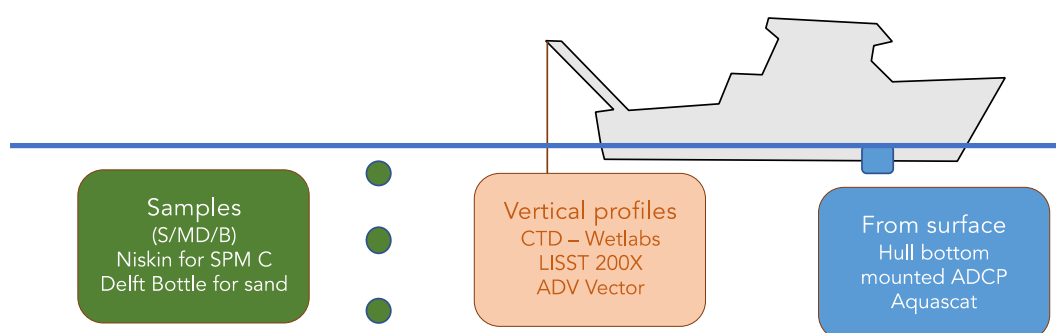


Figure 2. Embarcation Salmo de l'INRAE mobilisée pour les mesures dans la zone aval en aval de Port Saint Louis, et vue schématique des capteurs et mesures réalisées.

2.1.2 Capteurs et prélèvements

Deux familles d'instruments optiques et acoustiques, ont été utilisées durant cette campagne exploratoire, en plus d'un capteur CTD HOBO.

Les capteurs optiques regroupent un turbidimètre optique OBS5, un turbidimètre optique WETLABS NTUSB et un LISST200X. Les turbidimètres fonctionnaient en autonome avec une cadence de mesure de 1Hz pour le Wetlabs NTUSB et une mesure moyenne toutes les 18s pour l'OBS5. Le LISST200X, mesurant le spectre en classe de taille des particules en suspension, réalisait des mesures en temps réel à 0.33Hz, piloté par un PC à bord. Une mesure de blanc avait été réalisée en laboratoire à l'INRAE avant la campagne. Ces trois capteurs étaient fixés sur la cage profilante (Figure 3).

Trois capteurs acoustiques ont été mis en œuvre. Un ADCP RDI Workhorse/Monitor 600KHz en mode bottom-track était déployé en subsurface depuis le bateau, orienté vers le fond pour mesurer l'intensité et la direction du profil vertical de courant et mesurer l'intensité acoustique rétrodiffusée. Un ADV, courantomètre ponctuel de fréquence acoustique 6MHz, était déployé depuis la cage instrumentée pour mesurer l'intensité acoustique rétrodiffusée, travaillant comme un capteur acoustique de turbidité (cadence de 8Hz). Un Aquascat 1000R était mis en œuvre depuis une plateforme flottante accouplée au bateau. Ce dispositif permet de mesurer l'intensité acoustique rétrodiffusée avec 4 transducteurs de fréquences acoustiques complémentaires.

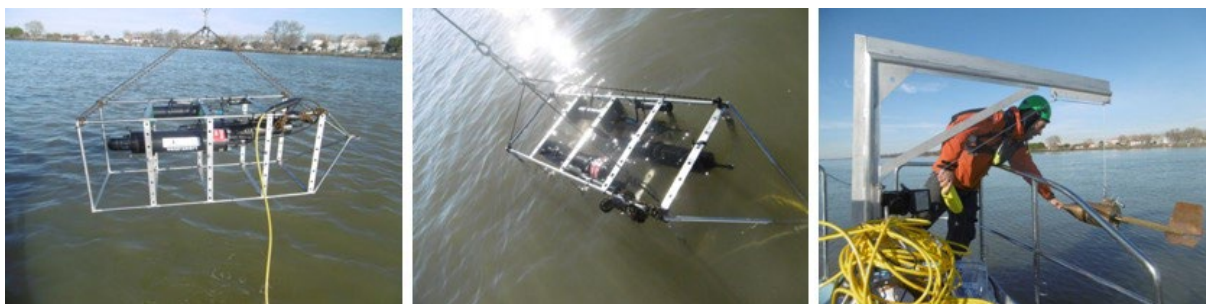


Figure 3. Mise en œuvre de la cage instrumentée de la bouteille de Delft à partir de l'embarcation Salmo.

Des prélèvements de sédiments en suspension ont été réalisés à l'aide d'une bouteille Niskin horizontale pour les sédiments totaux et une bouteille de Delft (Figure 3) pour les sédiments sableux. Ces prélèvements ont été analysés en laboratoire à l'INRAE pour quantifier la concentration massique en sédiments en suspension et pour caractériser le spectre en classe de taille défloculé.

Les données des capteurs présents sur la cage profilante (NTUSB Wetlabs, OBS5 and ADV Vector) ont été traités de façon à obtenir des données grillées verticalement tous les 0.25m en ne s'intéressant qu'au profil descendant, réalisé plus lentement pour garantir un échantillonnage optimal de la colonne d'eau.

2.2 Résultats

2.2.1 Calibration des capteurs optiques

Les capteurs optiques OBS et Wetlabs FLNTU sont calibrés en usine pour mesurer la turbidité de l'eau en NTU. Les prélèvements discrets réalisés à partir de la bouteille Niskin permettent de réaliser une calibration a posteriori et de convertir les données de turbidité (NTU) en concentration massique en g/l. Lors de la campagne de décembre 2021, la gamme de turbidité et de concentration en MES observée d'amont en aval et en travers de la section était réduite. Une calibration est proposée mais devra être étendue ultérieurement pour être consolidée (Figure 4). Ces coefficients de calibration, autour de 0.001 g/l/NTU, sont dans la gamme de variation généralement attendue (Verney, 2019) mais plus faibles que ceux obtenus en mer dans le panache du Rhône (Gangloff, 2017). Sans données supplémentaires il n'est pas possible de conclure sur ces différences observées.

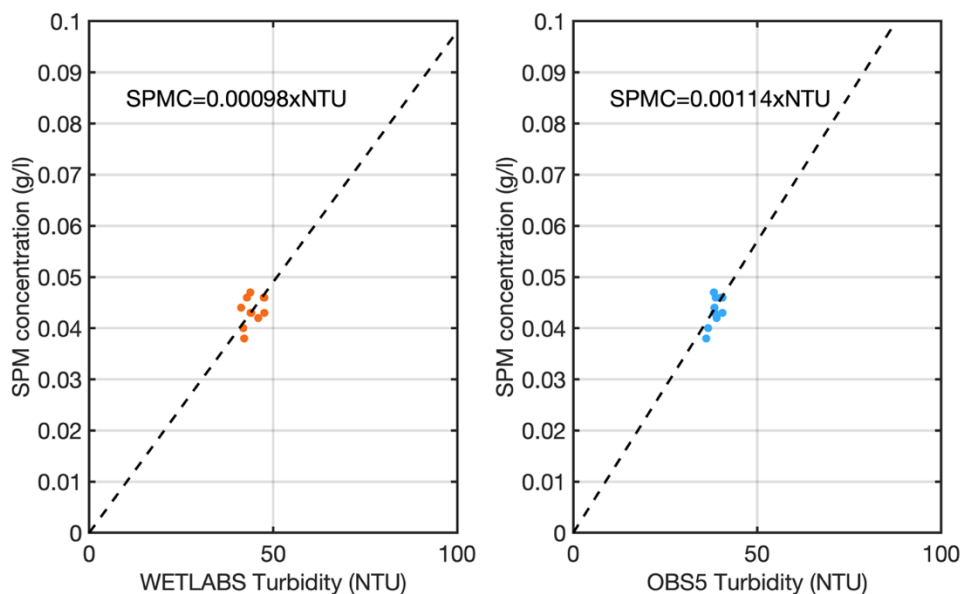


Figure 4. Calibration des capteurs optiques FLNTU Wetlabs et OBS5 lors de la campagne de Décembre 2021 en aval de Port Saint Louis du Rhône

2.2.2 Variabilité spatiale des concentrations en sédiment en suspension

Il est possible à partir des profils verticaux de turbidité d'évaluer la variabilité sur la section du fleuve au niveau de Port Saint Louis du Rhône (PK320) et en aval jusqu'à la barre d'embouchure (Figure 1).

Section transversale PK320

Trois stations en travers de la section au PK320 ont été échantillonnées à 85m (RG), 170m (~milieu de section) et 255m (RD) de la rive gauche. Le dernier point est donc représentatif de la rive droite. La profondeur de la section est d'environ 10m, avec toutefois un gradient bathymétrique entre rive droite et rive gauche, cette dernière étant plus profonde. Les concentrations en MES sont très homogènes sur la verticale, et peu variables entre les stations, avec des valeurs en moyenne autour de 0,045 g/l (Figure 5).

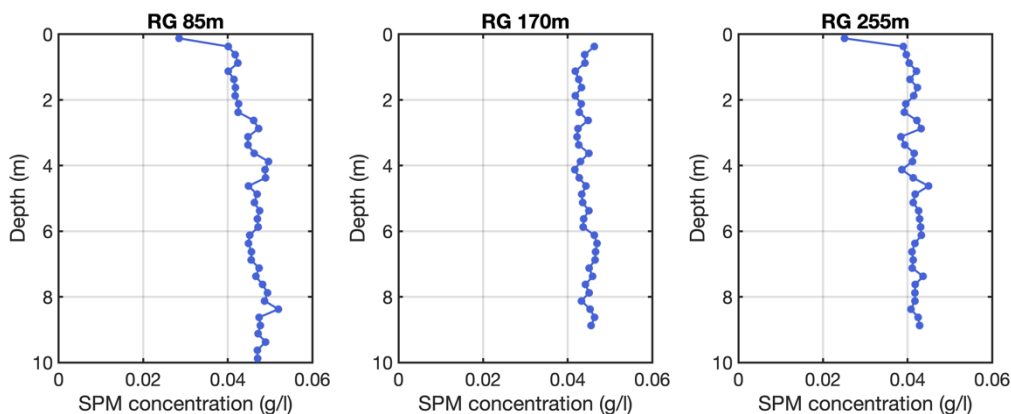


Figure 5. Profils verticaux de concentration en matières en suspension issues des mesures de turbidité du capteur NTUSB Wetlabs en trois stations (RG+85m, RG+170 et RG+255m) au droit du PK320.

Section longitudinale du pK320 à la mer

En plus du point en milieu de section au PK320, 4 autres stations ont été réalisées en milieu de chenal et plus en aval près de la zone d'embouchure (Figure 1). Les mesures montrent des profils très homogènes verticalement et une très faible variabilité longitudinale, avec des concentrations en MES proche de 0.042 g/l (Figure 6).

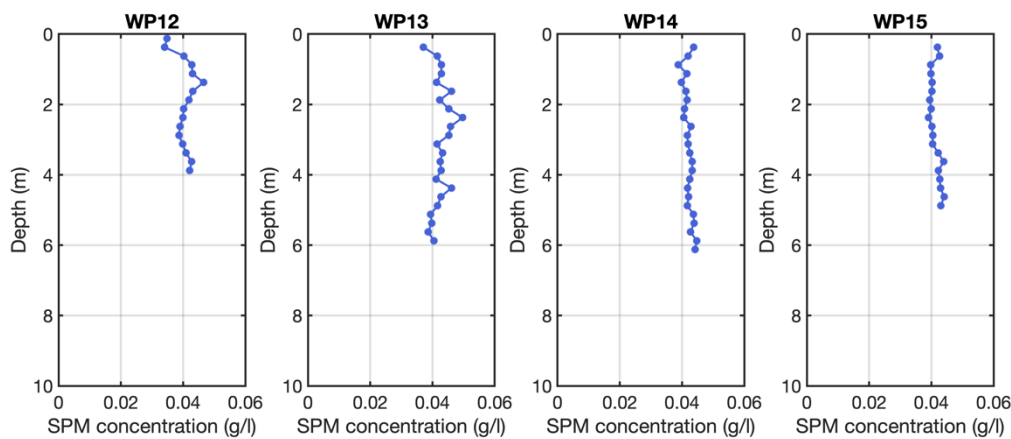


Figure 6. Profils verticaux de concentration en matières en suspension issues des mesures de turbidité du capteur NTUSB Wetlabs sur quatre stations (WP15 (amont), WP14, WP13 et WP12 (le plus en aval, à proximité de la barre d'embouchure)).

2.2.3 Distribution en classe de taille des sédiments en suspension

Au-delà de la quantification globale des concentrations en MES, nous nous sommes intéressés à leur structuration en classe de taille sur les deux sections via le capteur LISST200X.

Transversalement au PK320

Dans un premier temps, le profil RG255 montre en détail la variation verticale du spectre en classe de taille. Les autres profils sont proposés en annexe 1. De façon similaire au profil de concentration, le spectre est parfaitement homogène sur l'ensemble de la colonne d'eau, avec une distribution bimodale : un premier mode autour de $6\mu\text{m}$, de faible amplitude, et un mode dominant autour de $80\mu\text{m}$ (Figure 7).

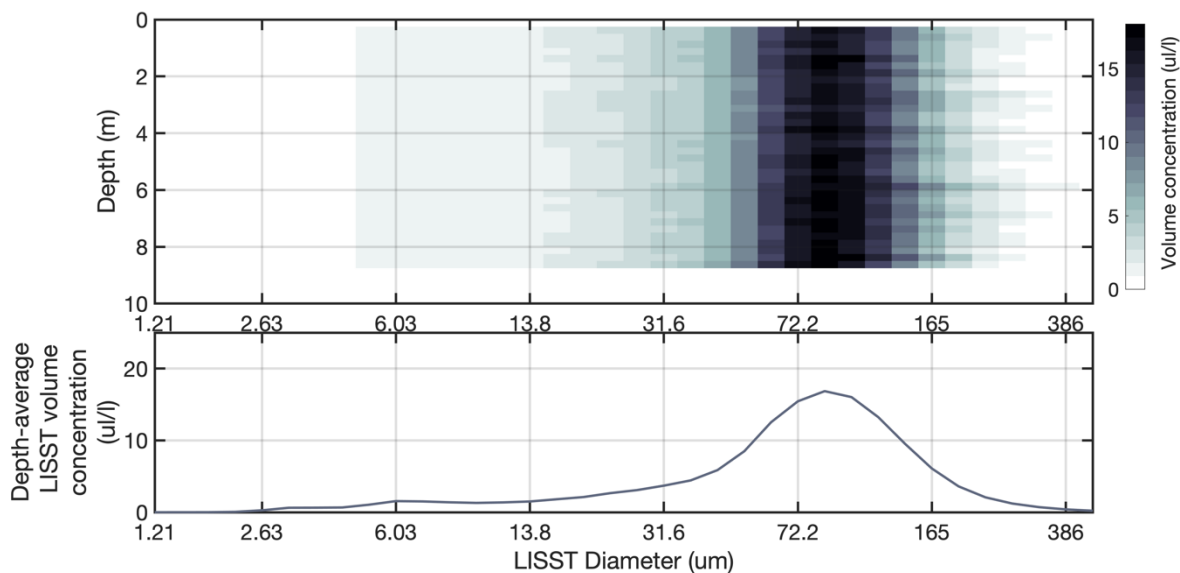


Figure 7. Spectre en classe de taille des particules à la station RG255 au droit du PK320. Haut : spectre en classe de taille le long de la colonne d'eau ; Bas : spectre moyenné sur la verticale.

La comparaison des spectres de surface (moyenne des 2m sous la surface) et de fond (derniers 2m du profil vertical de chaque station) (Figure 8) montre également peu de variabilité dans la section, avec les deux modes toujours présents, et dans des proportions similaires.

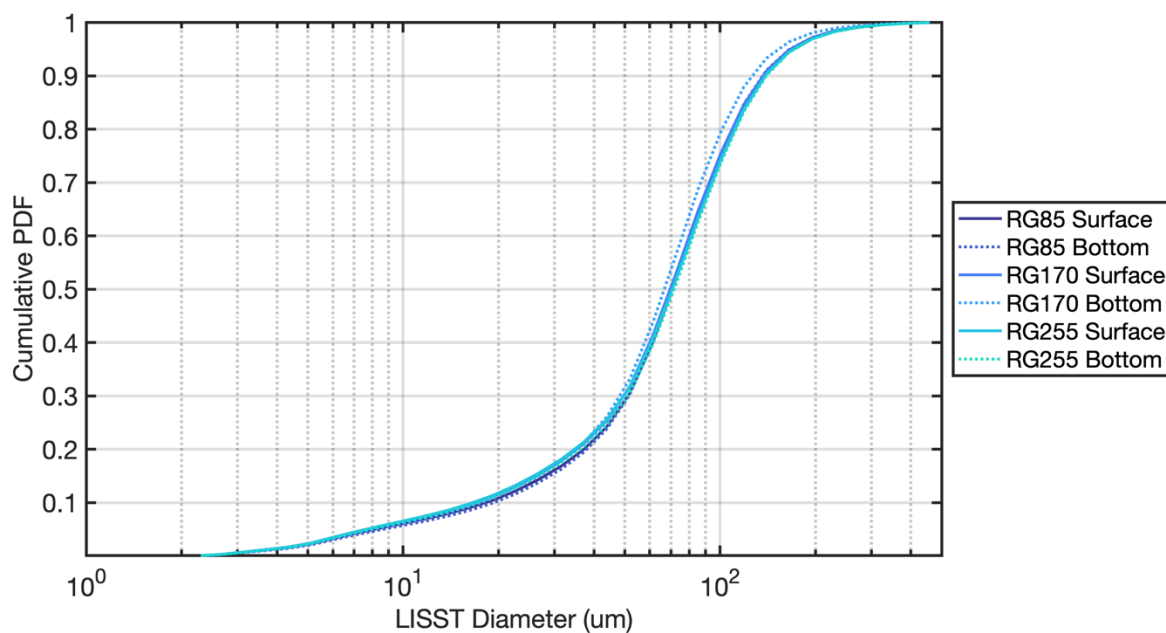


Figure 8. Distributions cumulées des spectres en classes de taille au droit du PK320 (RG85 ; RG170 et RG255) en surface (2m sous la surface) et au fond (derniers 2m du profil vertical).

Longitudinalement du PK320 à la mer

En aval, le comportement se distingue en fonction de la proximité de l'embouchure. Pour les deux stations les plus en amont (WP15, WP14), le spectre en classe de taille est similaire aux observations au PK320, avec une distribution bimodale et un mode dominant autour de 80µm (Figure 9 et 11).

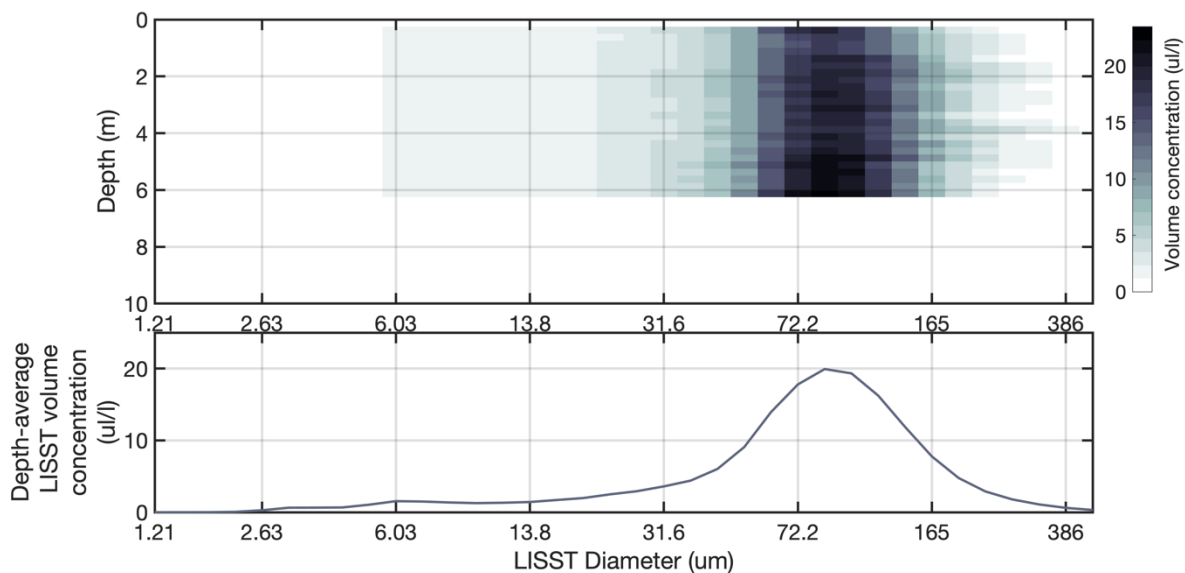


Figure 9. Spectre en classe de taille des particules à la station WP14. Haut : spectre en classe de taille le long de la colonne d'eau. Bas : spectre moyenné sur la verticale.

A proximité de l'embouchure, deux comportements sont observés (Figure 10) : une population bimodale « classique » dans le sens où elle est identique aux spectres en classe de tailles observés plus en amont, et une population tri-modale, avec un mode dominant à 300 μ m qui complète les deux modes précédemment observés. Cette population n'est observée que près du fond pour les stations les plus aval (WP12 et WP13, Figure 11). Elle pourrait traduire la présence dominante de sables moyens. Toutefois, le débit modéré rend cette hypothèse douteuse.

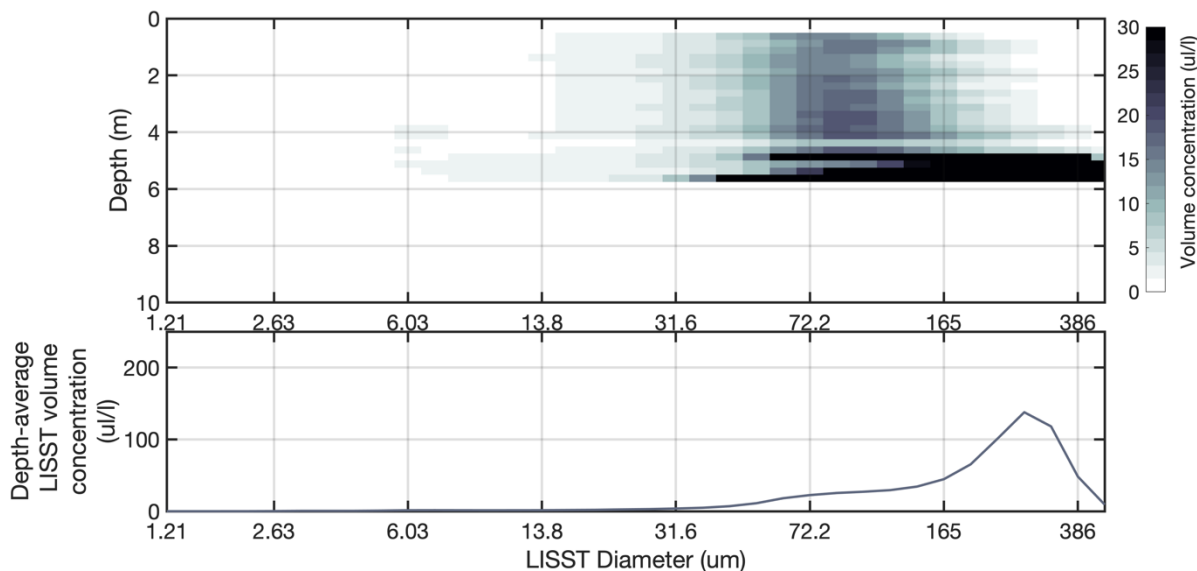


Figure 10. Spectre en classe de taille des particules à la station WP13. Haut : spectre en classe de taille le long de la colonne d'eau ; Bas : spectre moyenné sur la verticale.

L'impact de la salinité sur les mesures LISST (effet Schlieren) est une autre hypothèse qui a déjà été largement observée en estuaire de Seine (Verney, 2019 ; Chapalain et al., 2019). En présence d'un gradient de salinité, le faisceau laser est réfracté et vient frapper directement les détecteurs les plus au centre de l'instrument, correspondant après inversion à de fortes concentrations de particules de grandes tailles.

Dans cette zone très proche de l'embouchure le coin salé peut remonter dans le fleuve assez régulièrement même pour un débit de 2000 m³/s (cf chapitre 3). Les mesures de CTD n'étant pas disponibles à ces stations, nous ne pouvons pas confirmer cet effet, mais notre expertise indique que ce doit être l'hypothèse principale à prendre en compte. Cette hypothèse est aussi appuyée par la comparaison des concentrations volumiques et des concentrations massiques issues des mesures de turbidité, développée dans la section ci-dessous.

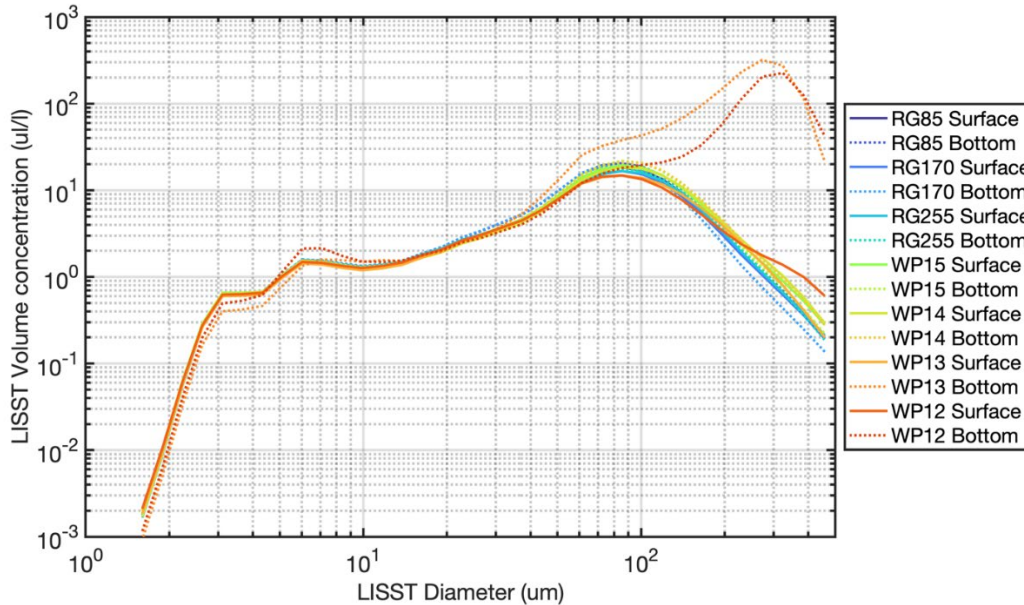


Figure 11. Distributions des spectres en classes de taille (concentration volumique) pour l'ensemble des stations (RG85 ; RG170 et RG255 ; WP15 ; WP14 ; WP13 ; WP12) en surface (2m sous la surface) et au fond (derniers 2m du profil vertical)

2.2.4 Analyse de la densité des particules en suspension

En complément des informations sur le spectre en classe de taille des particules en suspension, l'analyse conjointe des concentrations volumiques par classe de taille ($C_{VOL,i}$) et des concentrations massiques totales issues des mesures du turbidimètre optique (C_{MES}) permet de qualifier la densité effective des particules. La confrontation directe des concentrations volumiques et optiques a montré que ces particules en suspension n'étaient pas des particules individuelles mais des agrégats (Figure 12), dont la densité effective $\Delta\rho$ était entre 200 et 400kg/m³. Des particules individuelles se caractériseraient par des densités effectives supérieures à 1300kg/m³. Il faut rappeler que ces densités effectives ne sont que des ordres de grandeurs et qu'elles ne tiennent pas compte du spectre en classe de taille des particules.

Pour aller plus loin, il est possible d'utiliser une approche fractale équivalente telle que décrite dans Chapalain et al. (2019) :

$$(\rho_f - \rho_w) = \Delta\rho_f = (\rho_p - \rho_w) \left(\frac{D_p}{D_f} \right)^{3-nf}$$

Et finalement :

$$C_{MES} = \sum_{i=1}^{36} \frac{\Delta\rho_{f,i}}{1 - \frac{\rho_w}{\rho_p}} C_{VOL,i}$$

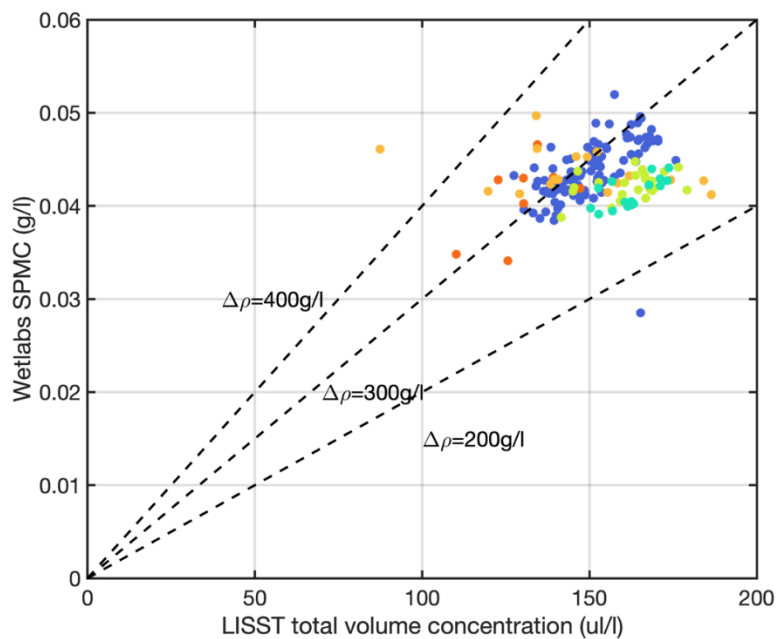


Figure 12. Comparaison des mesures de concentration volumique totale issue du LISST et des concentrations massiques obtenues après calibration du turbidimètre optique. Les couleurs représentent les stations réalisées dans le Rhône. Bleu : section au droit du PK320 ; Vert à orange, stations longitudinales du fleuve à la mer (vert clair – amont ; orange foncé – aval). Les lignes pointillées représentent des densités effectives moyennes sans prendre en compte la distribution en classe de taille.

Le caractère « théoriquement fractal » des particules en suspension est largement discuté et discuté dans la communauté scientifique. On parlera ici d'approche fractale équivalente, car nous faisons l'hypothèse d'une relation puissance unique sur l'ensemble du spectre en classe de taille reliant la taille des particules et leur densité. Dans cette application, les particules en suspension sont supposées être composées de particules primaires de taille $2\mu\text{m}$. La dimension fractale n_f est un indicateur qualitatif qui représente l'état de compaction des agrégats : comprise entre 1 et 3, une valeur proche du maximum implique une particule solide non poreuse, comme un grain de sable par exemple, et une dimension fractale inférieure à 2 un agrégat fragile, peu dense et aéré. En moyenne, la dimension fractale en milieu aquatique varie entre 1,5 et 2,5. Une faible dimension fractale est souvent associée à la présence de matière organique, comme lors de blooms phytoplanctoniques par exemple.

La dimension fractale calculée pour les stations amont (RG85 ; RG170 ; RG255 au PK320) et aval (WP15-WP14) est peu variable (Figure 13), comprise entre 2.25 et 2.3, avec une légère tendance à la baisse. Ainsi, pour des agrégats de $\sim 100\mu\text{m}$, la densité effective des floccs est de l'ordre de 80 à 199kg/m^3 (Figure 14).

Les stations WP13 et WP12 se caractérisent par une forte variabilité, avec des dimensions fractales pouvant être très faibles (Percentile 10 de la dimension fractale à 1.8). Ces résultats atypiques sont la conséquence de l'effet Schlieren, avec la détection d'un artefact de population de grande taille : la concentration volumique des grandes classes de particules est ainsi surestimée, qui doit être compensé par des densités effectives plus faibles, donc des dimensions fractales plus faibles.

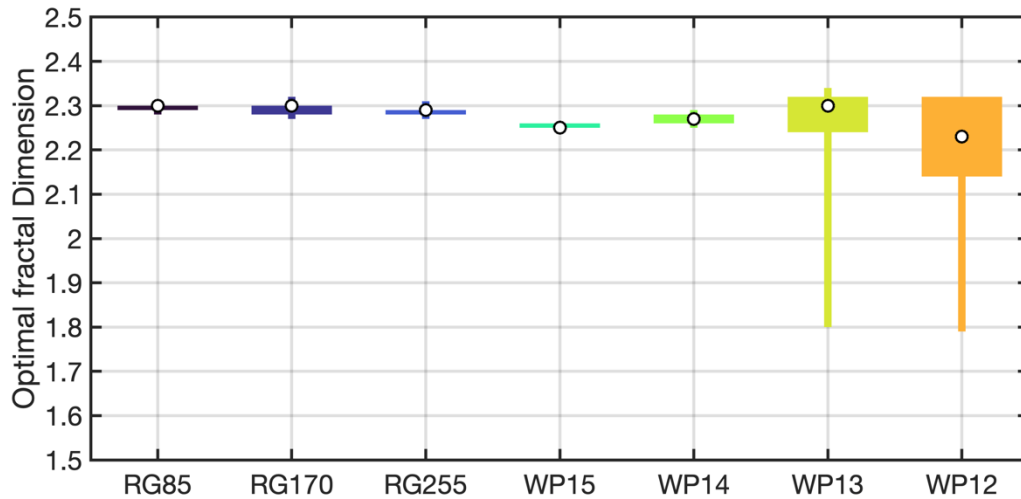


Figure 13. Distribution statistique de la dimension fractale optimale calculée par station à l'aval de Port Saint Louis du Rhône. Les ronds indiquent le percentile 50, les rectangles les percentiles 25 et 75, les barres les percentiles 10 et 90.

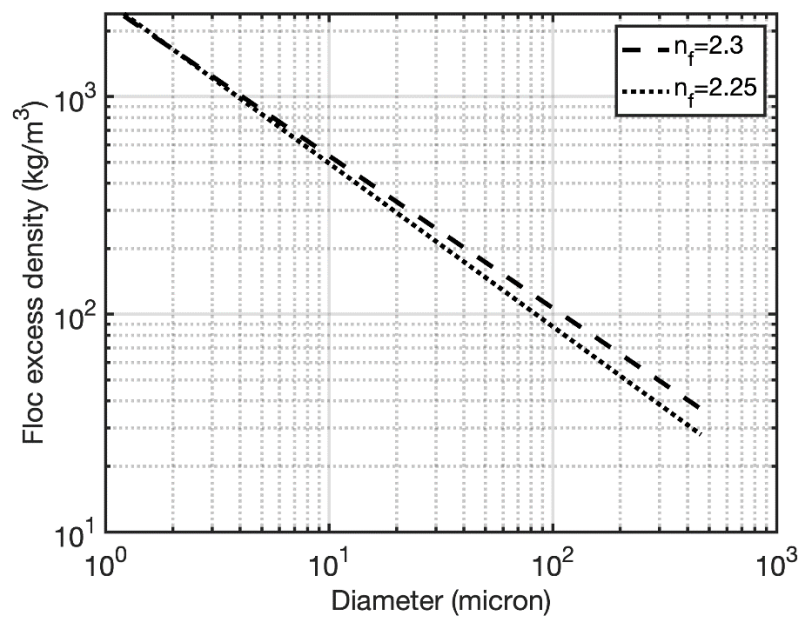


Figure 14. Relation taille-densité effective des agrégats selon l'approche fractale, pour des dimensions fractales optimales entre 2.25 et 2.3.

2.2.5 Apport d'un couplage optique/acoustique

Afin de détecter la présence de sable en suspension, une dernière méthode a été appliquée. Elle repose sur la combinaison des mesures optiques (plus sensibles aux sédiments fins – turbidimètre optique NTUSB Wetlabs) et des mesures acoustiques (plus sensibles aux sables, ADV Vector).

Cette méthode, détaillée dans Pearson et al. (2021), calcule un indice de composition du sédiment (SCI, Sediment Composition Index) tel que :

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

Où SPMC est la concentration en matière en suspension, en g/l et SNR le rapport signal sur bruit (dB) mesuré par l'ADV. Cet indice a été validé en laboratoire (Figure 15), caractérisant des suspensions sableuses par des valeurs très négatives, tandis que des sédiments plus fins se caractérisent par des valeurs proches de 0 (après normalisation).

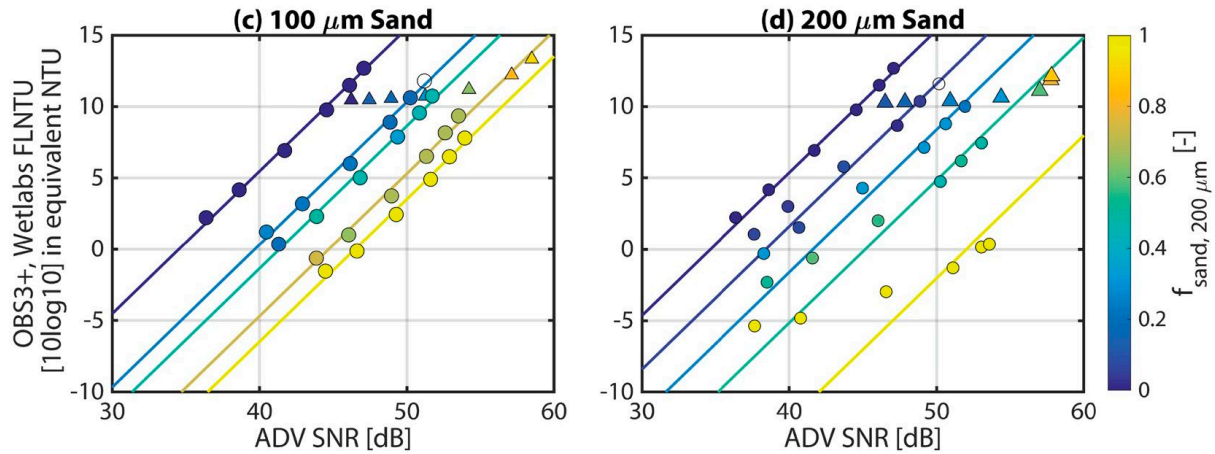


Figure 15. Relation entre mesures optiques et acoustiques pour des gammes croissantes de concentration de mélanges sablo-vaseux (et vase pure / sable pure). Le SCI correspond au décalage des relations linéaires (de pente 1) caractérisant une fraction de sable donnée. Pearson et al., 2021.

L'étape de normalisation consiste à forcer le SCI à valoir 0 en présence de sédiments fins uniquement, lorsque les conditions hydrodynamiques sont faibles, i.e. faible courant et absence de vagues. Le SCI peut alors être relié à une fraction de sable au sein des particules en suspension (Figure 16). Si cette normalisation est aisée en zone tidale, où les étales permettent d'observer des périodes de faible énergie, cette étape a été plus compliquée à réaliser ici. Arbitrairement, la valeur la plus grande de SCI a été utilisée pour normalisation, i.e. forcée à valoir 0.

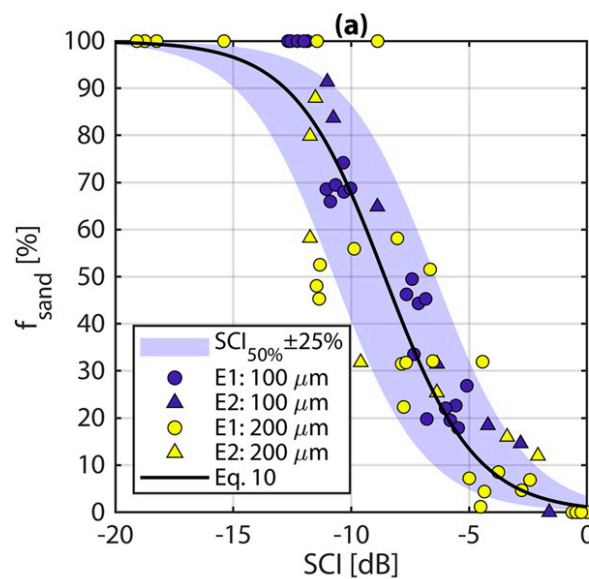


Figure 16. Relation entre SCI et fraction de sable en suspension obtenue à partir d'expérimentation en laboratoire (Pearson et al., 2021).

L'application de cette méthode au jeu de données collecté en décembre 2021 (Figure 17) n'indique pas de variations significatives. L'indice SCI présente des profils verticaux homogènes et similaires aux stations dans la section PK320 et aux points WP15 et WP14. Les points les plus en aval indiquent la présence d'un gradient surface/fond, et donc possiblement la présence de sable en suspension au fond (<10%, sur la base de la calibration en laboratoire). Ces résultats sont toutefois à prendre avec précaution du fait de la présence du biseau salé aux points aval, qui pourrait biaiser certaines observations. Ces analyses préliminaires sont évidemment à confirmer par des mesures complémentaires le long d'un gradient de conditions de débit, et des mesures de référence à l'aide d'échantillonneurs adaptés, type bouteille de Delft ou préleveur ponctuels (P-72, P-61).

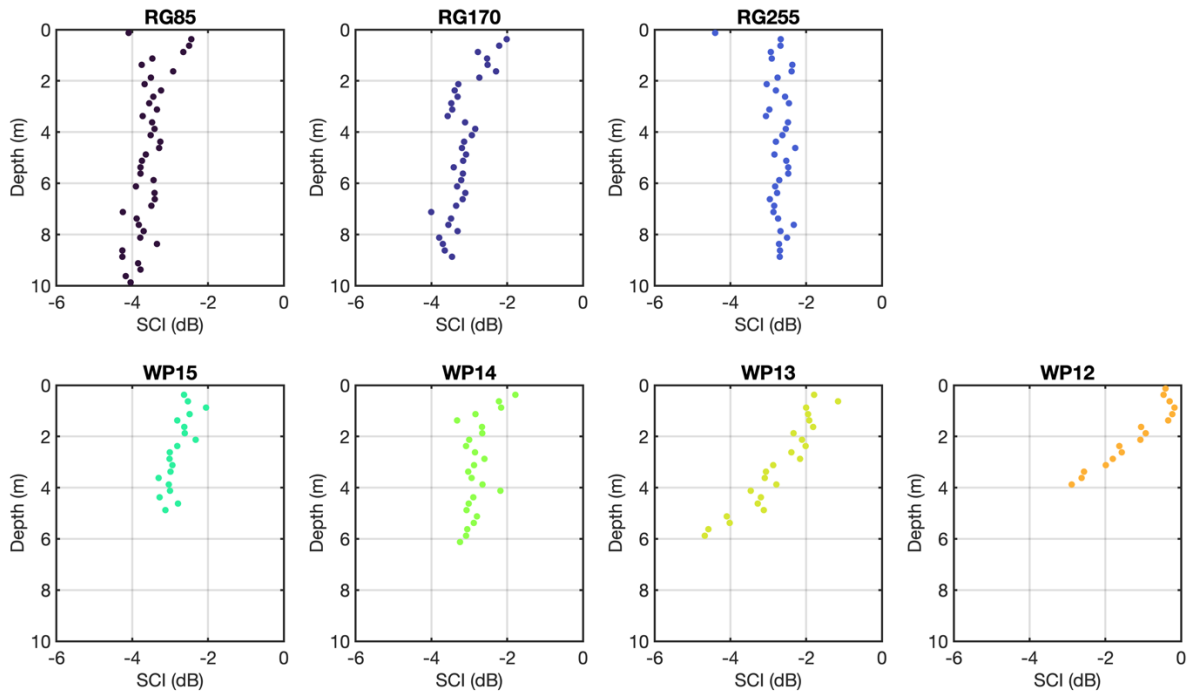


Figure 17. Variabilité verticale de l'indice de composition du sédiment (SCI) pour chaque station à l'aval de Port Saint Louis du Rhône.

2.2.6 Jaugeage du débit du Rhône au PK320 par ADCP

La réalisation d'un transect ADCP a permis de réaliser un jaugeage du débit du Rhône au droit du PK320 (Figure 18). Le protocole est similaire aux jaugeages réalisés plus en amont par l'équipe Riverly. Le débit mesuré le 15/12/21 est de $2010 \text{ m}^3/\text{s} \pm 4.6\%$ (Incertitude QRevInt à 95%).

On peut voir en Figure 18 que les vitesses sont relativement faibles avec un maximum proche de 0.9 m/s au niveau de la veine rapide positionnée en rive droite où les profondeurs sont les plus grandes (proche de 13 m).

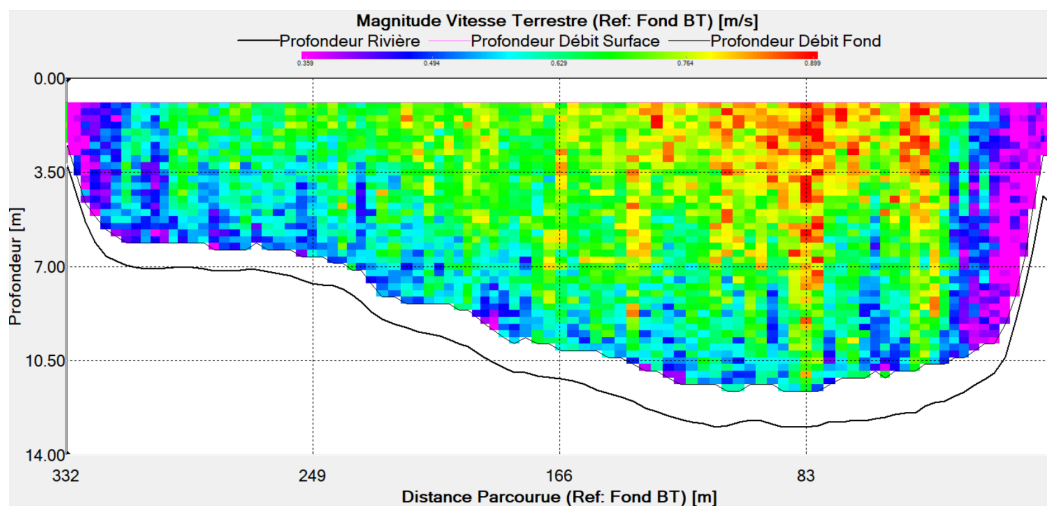


Figure 18. Variabilité verticale et transversale du courant dans la section au droit du PK320 le 15 décembre 2021, pour un débit de 2010 m³/s. Echelle de couleur des vitesses : 0.359-0.899 m/s.

2.2.7 Estimation d'un flux solide au PK320

Concernant les sables, les échantillons prélevés à la bouteille Niskin ont montré de faibles valeurs et une très forte hétérogénéité, avec des valeurs parfois surprenantes comme par exemple des concentrations en sable plus fortes en surface qu'au fond (Figure 19 et Figure 20). Il est important de rappeler que les bouteilles Niskin ne sont pas adaptées pour quantifier précisément les sables en suspension quand les concentrations sont si faibles, car leur volume d'échantillonnage de 2,2 litres, est insuffisant. Le débit moyen de décembre 2021 n'était pas suffisamment énergétique pour remettre en suspension des quantités significatives de sable, et les très grandes variations de concentration en sable doivent être considérées comme douteuses.

Le Tableau 1 indique les résultats des prélèvements réalisés sur la verticale de la section au droit du PK320 où des sables ont été observés. Cela inclut les deux prélèvements avec la bouteille de Delft où la concentration a été évaluée sur la base des vitesses du courant estimées à partir du jaugeage ADCP (Figure 18). Les résultats issus de la bouteille ne sont pas plus cohérents que ceux de la Niskin, avec eux aussi une valeur plus faible proche du fond. Les valeurs plus faibles issus de la bouteille de Delft restent cependant cohérentes avec d'autres observations dans d'autres contextes de comparaison (Beverage & Williams, 1989 ; Marggraf, 2024).

Tableau 1. Estimations des concentrations sur la verticale centrale (y=170 m) sur la section au droit du PK320.

| Préleveur | Profondeur (m) | Hauteur relative (z/h) | Vitesse (m/s) | Flux (g/s/m ²) | Concentration (g/L) |
|--------------------|----------------|------------------------|---------------|----------------------------|---------------------|
| Niskin | 0.2 | 0.98 | 0.70 | - | 0.024 |
| Niskin | 6 | 0.50 | 0.65 | - | 0.036 |
| Niskin | 11 | 0.08 | 0.45 | - | 0.015 |
| Bouteille de Delft | 10 | 0.17 | 0.55 | 6.6 | 0.012 |
| Bouteille de Delft | 11 | 0.08 | 0.45 | 1.3 | 0.003 |

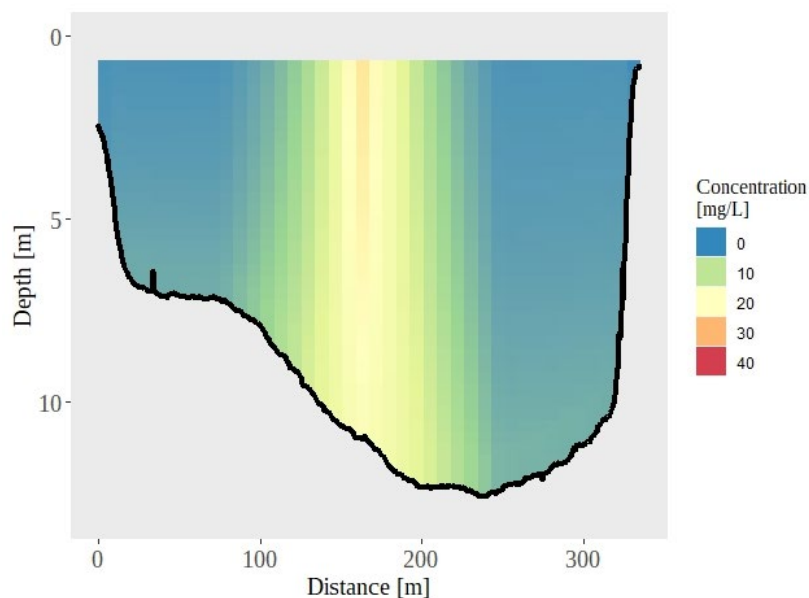


Figure 19. Extrapolation des concentrations en sable à partir de 9 points de prélèvements Niskin sur la section au droit du PK320.

La Figure 20 présente les mesures de concentration sur la verticale centrale, la seule où des sables ont pu être observé (Figure 19). Sachant que la théorie donne une concentration a priori croissante en s’approchant du fond, nous avons ici une confirmation des très fortes incertitudes de nos mesures sur cette campagne.

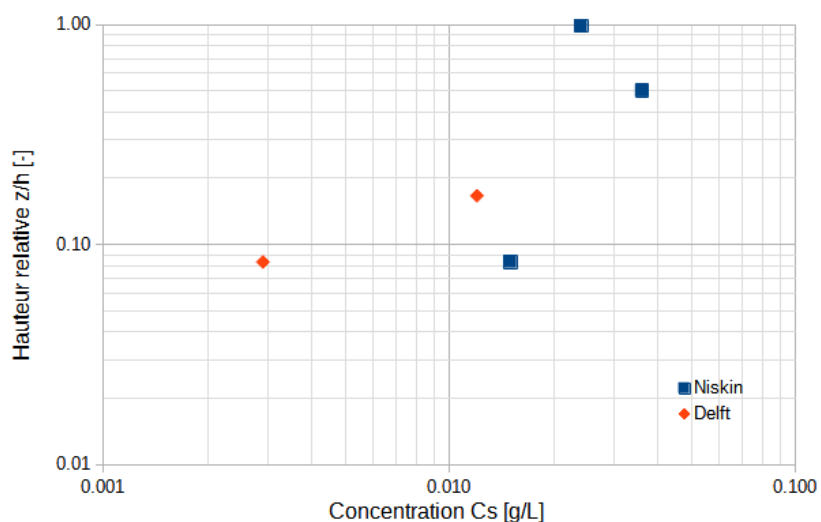


Figure 20. Profil de concentration mesuré sur la verticale centrale ($y=170\text{m}$ par rapport à la rive gauche) au PK320.

Le flux de sable dans la section est calculé à partir du jeu de données ADCP (Figure 18) et des résultats d’analyses différenciées des fines et sables par tamisage filtration (Figure 19). Comme discuté ci-dessus, les concentrations en sable sont très incertaines entre 1 et 36 mg/l, peut-être à cause d’une contamination des échantillons lors du prélèvement ou de la phase d’analyse. En appliquant le code SDC développé par Marggraf et al. (2024 en révision), le flux de sable (particules $>63\mu\text{m}$) calculé est de 13 kg/s et le flux de fines (particules $<63\mu\text{m}$) est de 83 kg/s. Les flux de sable calculés à la bouteille de Delft sont quant à eux de 22 et 4,4 kg/s en appliquant les résultats des deux seules mesures sur la section centrale (Tableau 1) à la section mouillée déterminée par ADCP. Comme discuté précédemment, ces données sont très incertaines et doivent être considérées avec la plus grande prudence.

2.3 Synthèse

Cette première expérimentation a permis de tester la mise en œuvre de protocoles de mesures en aval de Port Saint Louis du Rhône, dans la zone de biseau salé et d'embouchure, via une campagne de mesure en Décembre 2021.

Techniquement, la suite de capteurs déployés pendant la campagne, notamment sur la cage instrumentée, s'est montrée adaptée à l'étude des particules en suspension. La complémentarité des capteurs optiques et acoustiques pour caractériser à la fois le spectre en classe de taille des agrégats en suspension, leur densité effective et la possible présence de sable en suspension est avérée. Ceci nécessite néanmoins maintenant des mesures complémentaires sur une large gamme de débit, afin d'explorer les différentes situations de transport sédimentaire. Des mesures par préleveur ponctuel intégrateur seraient aussi à privilégier pour valider les méthodes instrumentales.

Toutefois, des difficultés sont à souligner dans la mise en œuvre des instruments et des moyens nautiques. La cage optique, bien que lestée et avec peu de débit, a été compliquée à faire profiler en contre-courant. En dérive, le temps de descente/remontée (~5minutes) a été long et implique une gestion du déplacement du bateau qui devient complexe pour le pilote et pose la question de la représentativité spatiale de la mesure. Pour des gammes de plus fort débit, la question de la faisabilité de ce type de mesure en dérive reste donc très importante. De plus, l'éloignement du site de mesure des centres de recherche des partenaires rend très difficile la réactivité face aux événements ponctuels (mobilisation des personnels, du moyen nautique, des équipements). Ce point a directement limité le nombre de campagnes par rapport au prévisionnel, et il devra être pris en compte pour de futures observations.

3. Dynamique du coin salé

Le mélange eau douce/eau salée du Rhône se produit généralement en mer à l'extérieur du fleuve, sauf pour les débits inférieurs à 1500-2000 m³/s pour lesquels la mer pénètre dans le fleuve créant un phénomène de coin salé, avec l'intrusion d'une eau salée dense sous l'eau du fleuve. Ce mécanisme, connu depuis de nombreuses années, engendre un système bicouche avec deux masses d'eau qui se mélangent progressivement par friction, entraînant une salinisation de l'eau de surface dans la partie du fleuve à l'intérieur des terres (Savey et al., 1972 ; Levasseur & Doutriaux, 1992 ; Ibanez et al 1997 ; Radakovitch et al 2014). Si l'intrusion est très nette pour des débits de 1000-1200 m³/s en Arles, les travaux de l'OSR 5 (Radakovitch et al. 2021) ont montré qu'elle existait aussi dans la zone proche de l'embouchure pour des débits plus élevés. Le coin salé peut s'étendre jusqu'à un barrage naturel formé par un creusement du fond du fleuve : le seuil de Thibert entre Arles et le bac de Barcarin, situé à environ 30 km en amont de l'embouchure (Figure 21). Puisque la couche de surface se salinise progressivement par échange avec la couche inférieure, on a pu observer dans des cas d'étiage sévère des salinités de surface de plusieurs grammes/litres qui ont engendré des problèmes pour les riziculteurs ayant ainsi pompé de l'eau salée en surface et impacté une partie des récoltes en 2011 (BRL Ingénierie, 2014). Cette salinisation de la zone risque d'être bien plus courante et durable dans le futur avec les tendances attendues d'étiages récurrents. Aussi, bien qu'il soit connu, ce phénomène reste relativement peu étudié compte tenu de ses futurs enjeux, et son processus de mise en place et son extension sont relativement peu référencés.

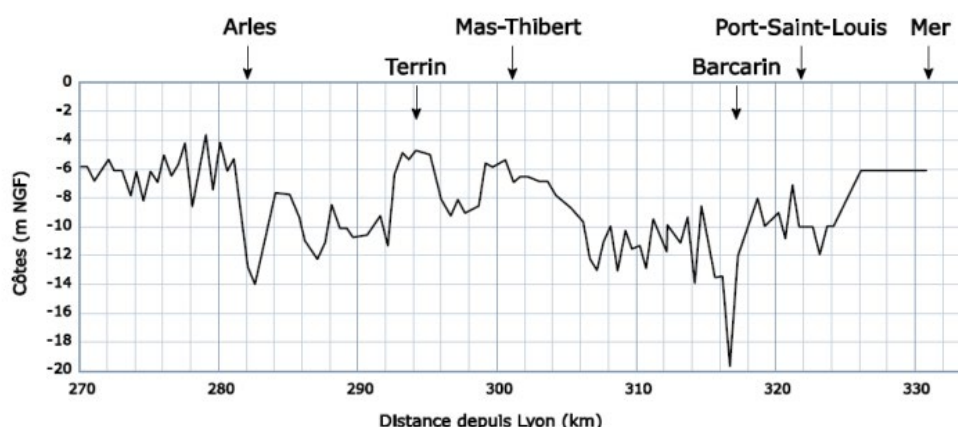


Figure 21: Evolution du fond du Grand Rhône sur ces derniers 60 km (d'après les données CNR compilées dans Antonelli 2002).

Dans le cadre de sa thèse sur la modélisation du transfert de ¹³⁷Cs dans le continuum Rhône-mer, Adrien Delaval (2021) a développé le modèle numérique DRACAR permettant de reproduire la stratification physique engendrée lors d'une remontée du coin salé (Delaval et al, 2022). Ce modèle a notamment utilisé pour son calage deux profils ADCP réalisés en Juillet 2020 pour valider les sorties. Pour l'OSR 6, l'IRSN devait compléter ces profils par de nouvelles campagnes afin de disposer de données sur une gamme plus étendue de débits, et finaliser d'intégrer dans le modèle Casteaur de l'IRSN le processus d'intrusion saline. Ce dernier point n'a pu être réalisé car la priorité du développement de Casteaur a été mise sur l'intégration de la propagation de contaminant, qui est présentée dans un autre livrable de l'action D de l'OSR 6. Le rapport ci-dessous présente les résultats des campagnes de terrain 2021-2022.

3.1 Campagnes de terrain Coin salé 2021-2022

L'action A4 prévoyait de réaliser 3 campagnes de terrain en 2021 puis en 2022 pour acquérir des profils de salinité/température et de vitesse de courant (par ADCP Acoustic Doppler Current Profiler) dans la zone de propagation du coin salé. L'objectif était de travailler sur une gamme de débit diversifiés entre 500 et 2000 m³/s.

Une seule campagne a pu être réalisée en 2021 à cause de problèmes matériel sur l'embarcation. Des campagnes complémentaires avaient été proposées pour 2023 mais elles n'ont pas pu être réalisées à cause de l'hydrologie particulière de cette année. En effet, nous recherchions des débits de l'ordre de 1000-1500 m³/s pour combler les manques de données, or les débits sont restés sous la barre des 1000 m³/s de mi-juillet à mi-novembre avant de monter très soudainement à 3000 m³/s.

Le tableau 2 synthétise les campagnes réalisées en OSR-5 (2020) et OSR-6 et les données acquises. En septembre 2022, une sonde de turbidité Wisens nouvellement acquise a été utilisée pour la première fois.

Tableau 2: synthèse des campagnes de terrain réalisées sur le coin salé du Rhône entre 2020 et 2022. Les débits moyens reportés sont calculés à partir des données BDOH. La remontée du coin salé est évaluée approximativement d'après les profils CTD ou les transects/profils en long réalisés avec l'ADCP. Les débits sont calculés à partir de BDOH.

| Date | Débit moyen Arles sur 48h | Débit moyen 5 jours Beaucaire | Position de la remontée du coin salé | CTD | ADCP | Turbidité |
|------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-----|------|-----------|
| 9/7/2020 | 963 | 983 | PK314 | X | X | |
| 29/7/2020 | 833 | 690 | Amont du PK322 | X | X | |
| 23/6/2021 | 1852 | 1793 | PK329 | X | X | |
| 7-8/7/2022 | 574 | 694 | PK303 | X | | |
| 27/9/2022 | 700 | 442 | PK299 | X | X | X |

Lorsque les observations des positions extrêmes de remontée du coin salé sont intégrées aux données historiques (Figure 22), on constate une corrélation forte avec le débit du fleuve comme l'avait déjà montré Ibanez et al (1997) et Delaval (2021). Ibanez et al (1997) avaient estimé que la valeur de débit à Beaucaire moyennée sur 5 jours était celle qui donnait les meilleurs résultats (ici $r^2 = 0,91$), mais un nouveau traitement statistique permettrait sans doute d'améliorer la relation. Par ailleurs, la régression est tirée par la mesure faite au débit de 1800 m³/s, et de nouvelles données entre 1000 et 1600 m³/s seraient nécessaires pour affiner ceci.

Il n'y a pas de critère précis pour définir la position du coin salé. Elle se fait à partir de l'observation de l'existence de deux couches superposées de densité différentes, qui peuvent être mises en évidence par différentes mesures selon les auteurs : salinité, sondeur, ADCP. Pour Ibañez et al. (1997) le coin salé du Rhône commencerait sa remontée pour de débits inférieurs à 1514 m³/s à Beaucaire, tandis qu'il remonterait seulement à partir de 1300 m³/s selon BRL Ingénierie citant des estimations de la CNR. La droite de régression qui ne prendrait pas en compte la valeur à 1800 m³/s intercepterait sur le figure 22 l'axe horizontal à 1451 m³/s, qui serait donc en quelque sorte le seuil de mise en mouvement de l'intrusion. Son équation serait alors: $y = -0.0345X + 50.57$ ($R^2 = 0,92$).

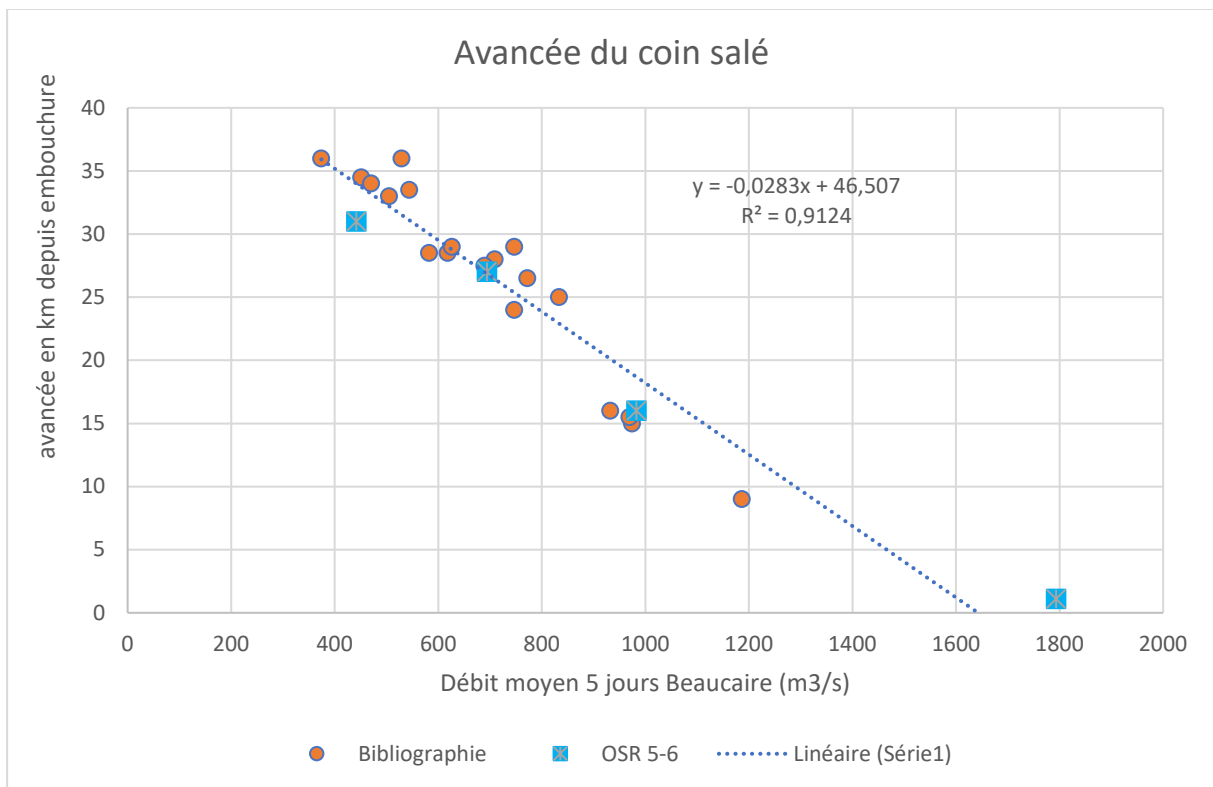
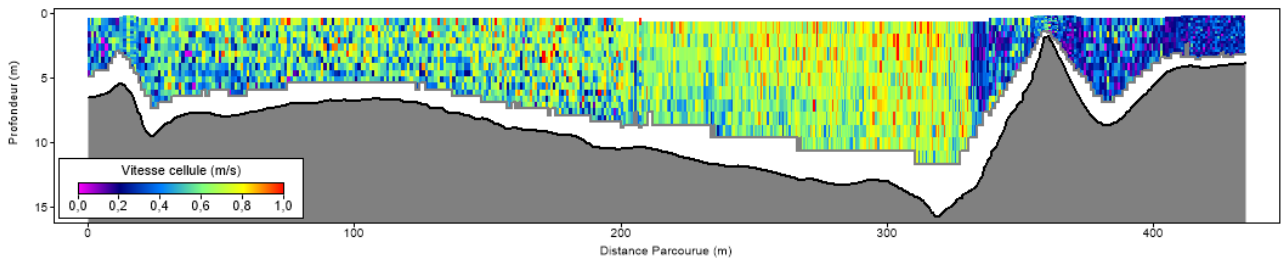


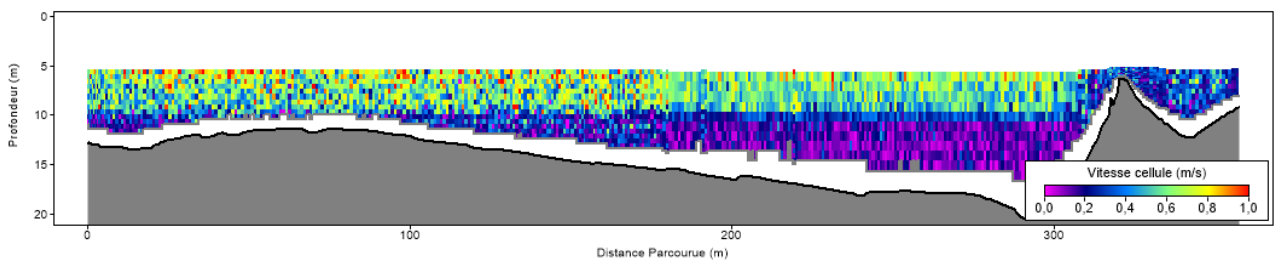
Figure 22: Positionnement de l'avancée dans le Rhône du coin salé (en km par rapport à l'embouchure) en fonction du débit moyenné sur les 5 jours précédents à Beaucaire. Données de position bibliographiques issues de Savey et al (1972) ; Levasseur et Doutriaux (1991) ; Ibanez et al (1997). Données 2020-2022 des OSR 5 et 6. La droite de régression est tracée pour l'ensemble des données.

Les profils de salinité et de vitesse de courant par ADCP de 2020 ont été présentés dans Radakovitch et al (2021). Quelques-uns des nouveaux profils 2021 et 2022 sont présentés ici en complément en figures 23 et 24. On y observe systématiquement la structuration en double couche qui s'amenuise progressivement vers l'amont. Durant la campagne du 7/7/2022, un profil en long réalisé depuis le PK 302 jusqu'au PK304,5 montre comment l'intrusion vient en partie buter sur un haut fond.

PK322, Port Saint-Louis du Rhône, de rive gauche (gauche) à rive droite. Juin 2021, 1800 m³/s



PK322 – Port Saint-Louis du Rhône, de rive gauche à rive droite. Juillet 2020, 833 m³/s



Profil longitudinal du Nord vers le Sud à l'embouchure, Juin 2021, 1800 m³/s. Amont à gauche, embouchure à droite.

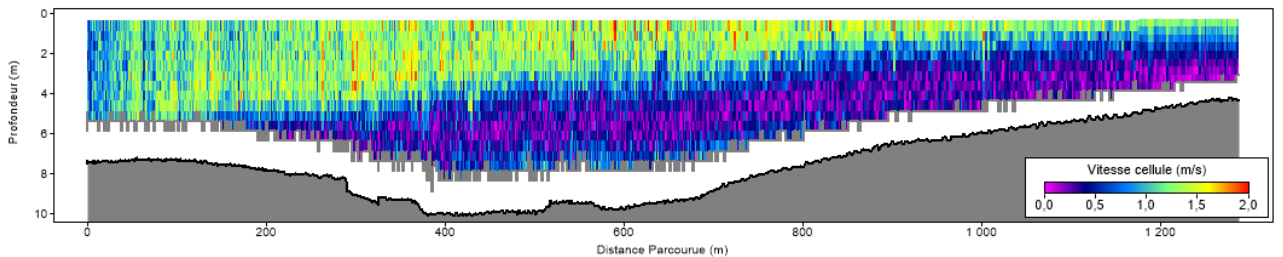
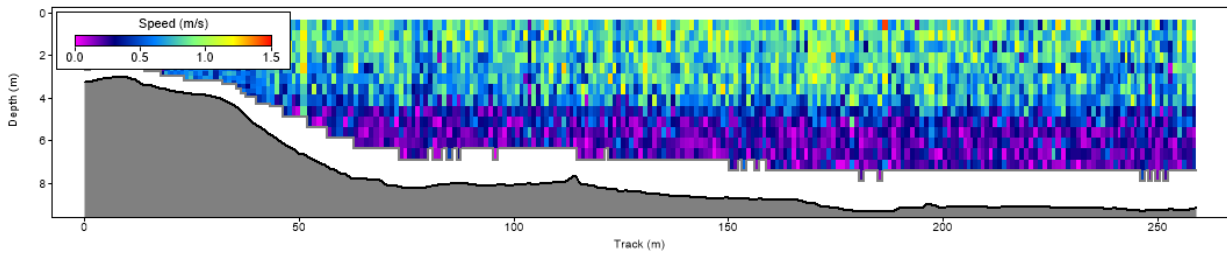
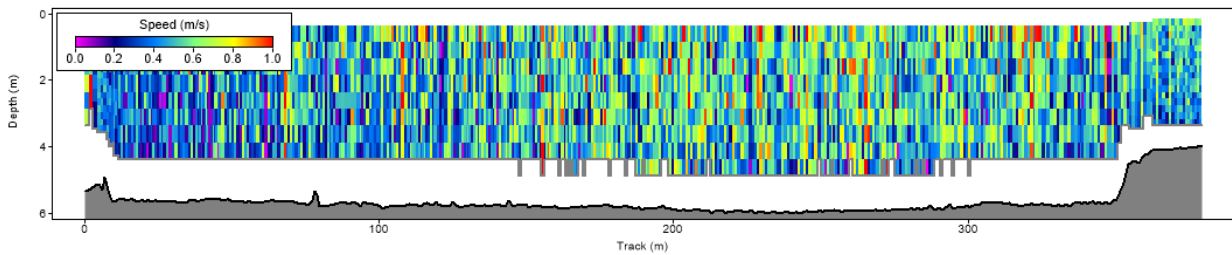


Figure 23: Profils de vitesse instantanée (m/s) mesurés par ADCP durant la campagne du 23/6/21 et du 9/7/2020 au niveau de Port Saint-Louis (PK 322). En Juin 2021 le débit élevé ne permet pas l'intrusion du coin salé, contrairement à Juillet 2020. Le profil du bas est établi le long du fleuve, depuis 1,3 km en amont (équivalent PK 328.7) et en descendant jusqu'à l'embouchure à droite (PK 330).

PK304, Juillet 2022 574 m³/s



PK300, Juillet 2022, 574 m³/s



Profil longitudinal en rive droite. Départ du PK302 à droite du graphique et descente vers l'aval de la droite vers la gauche. 574 m³/s

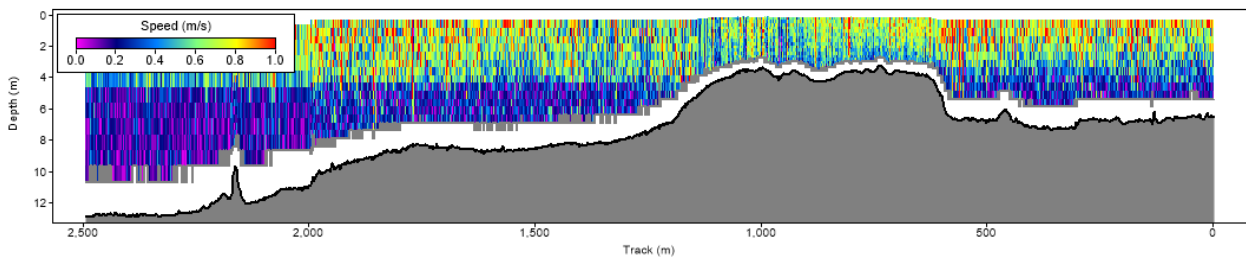


Figure 24: Profils de vitesse instantanée (m/s) mesurés par ADCP durant la campagne du 07/7/2022 montrant la transition des courants en amont et aval de l'intrusion saline, située entre PK 300 et PK304.

3.2 Modèle DRACAR

Le modèle hydrologique proposé par Delaval (2021) et baptisé DRACAR se base sur la résolution des bilans en sel, en eau et en énergie potentielle dans l'estuaire. Les équations sont décrites dans Delaval (2021) et Delaval et al. (2022). L'avancée du coin salé en fonction du débit des 48 dernières heures en Arles calculé par le modèle est présentée Figure 25. On retrouve la partie linéaire de la courbe similaire à la droite de régression (Figure 22) jusqu'à des débits de 1250 m³/s. En deçà, la longueur du coin salé diminue moins vite contrairement à la régression linéaire. Ainsi, le coin salé remonte encore sur théoriquement 5 km à 1500 m³/s là où les régressions linéaires comme celle de la figure 22 indiquent sa disparition.

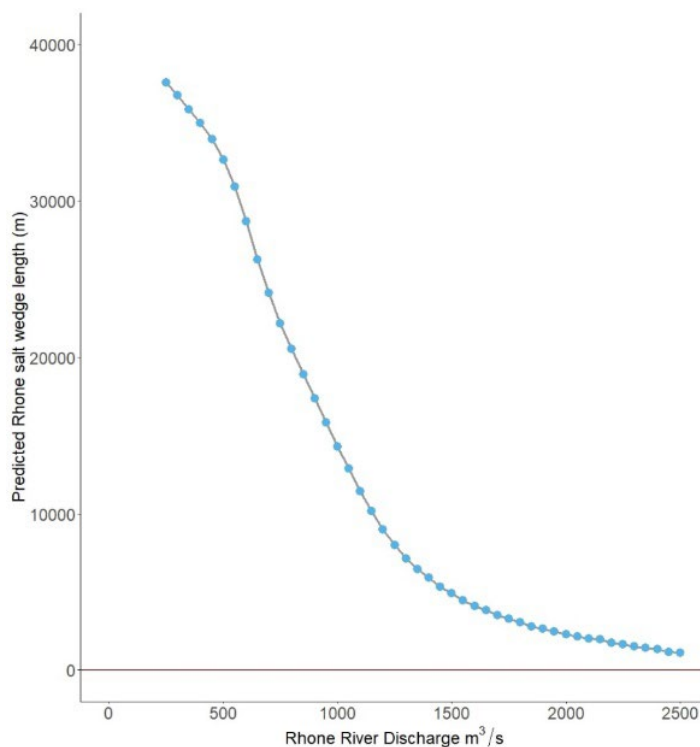


Figure 25: Progression du coin salé en fonction du débit du Rhône des 48 dernières heures. Modélisation par le modèle DRACAR.

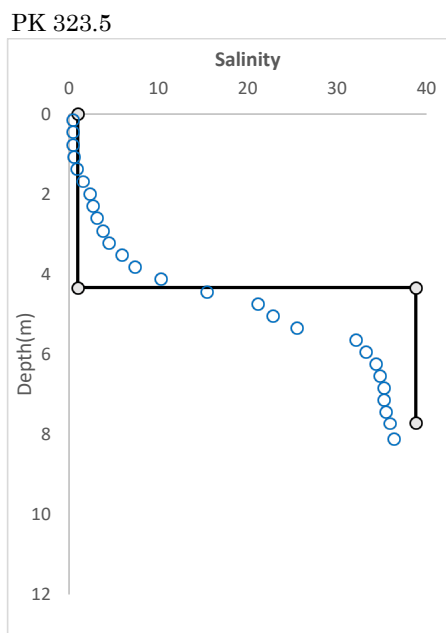


Figure 26: Profil de salinité pour le transect au PK 323.5 lors de la campagne du 09/07/2020 pour un débit en Arles des 48 dernières heures de 1022 m³/s. Les cercles bleus correspondent aux données acquises par la sonde CTD, tandis que le trait plein noir indique le profil fourni par le modèle DRACAR.

Le modèle permet de reproduire la structuration verticale des deux couches (Figure 26). Il a été validé en utilisant les campagnes de 2020 et le travail sur celles de 2021 et 2022 reste à réaliser. La figure 27 compare les valeurs de salinité estimées par le modèle en surface au PK 315 (Bac de Barcarin) avec les données obtenues en 2017 au même site où une sonde de salinité avait été mise en place (Radakovitch et al, 2014). La sonde était fixe et positionnée à environ 50 cm sous le 0 NGF et la salinité est moyennée

sur 48h. Les pics de salinité sont bien restitués ainsi que les périodes d'absence du coin salé (salinité de 0,2), mais le modèle est déphasé avec généralement un retard avec les observations. Ce résultat n'est pas surprenant car le modèle est en régime permanent et assume mal les effets transitoires. Les performances complètes du modèle sont reportées dans la thèse de Delaval (2021).

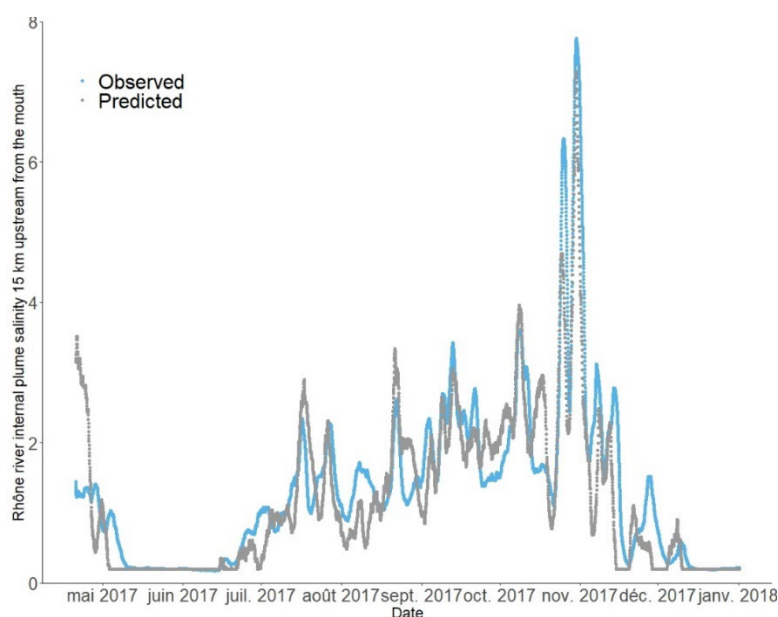


Figure 27: Comparaison des chroniques de salinité enregistrées en surface du fleuve au Bac de Barcarin en 2017 avec les sorties du modèle DRACAR. Les salinités observées sont moyennées sur 48 h.

La structure du coin salé du Rhône est relativement bien reproduite par le modèle DRACAR qui fournit la stratification, la salinité et les débits sortants à l'embouchure ainsi que la salinité moyenne dans l'estuaire, variables selon les conditions hydrodynamiques. Les performances de ce modèle confirment la viabilité de l'approche, qui pourrait être au besoin améliorée par la prise en compte du vent et des variations de la hauteur d'eau sur le Rhône, ainsi peut-être que les vitesses de courant issues de l'ADCP.

3.3 Profils de turbidité

En juillet 2022, la campagne a été réalisée par l'INRAE et IRSN avec différents appareillages. Malheureusement la CTD (sonde pression/température/salinité) de l'IRSN a été perdue en début de campagne. Cinq profils CTD ont pu être faits avec la sonde Castaway de l'INRAE, et trois en turbidité avec une sonde Wisens nouvellement acquise par l'IRSN. Seules deux stations regroupent des données CTD et turbidité (PK 323 et 324, Figure 28). La structure bicouche nettement visible en température et salinité induit un très léger décrochement en turbidité, avec des valeurs passant de 3 NTU en surface à 1 au fond, c'est-à-dire globalement de 3 à 1 mg/L (sonde non calibrée, utilisation de la relation proposée au 2.1.1).

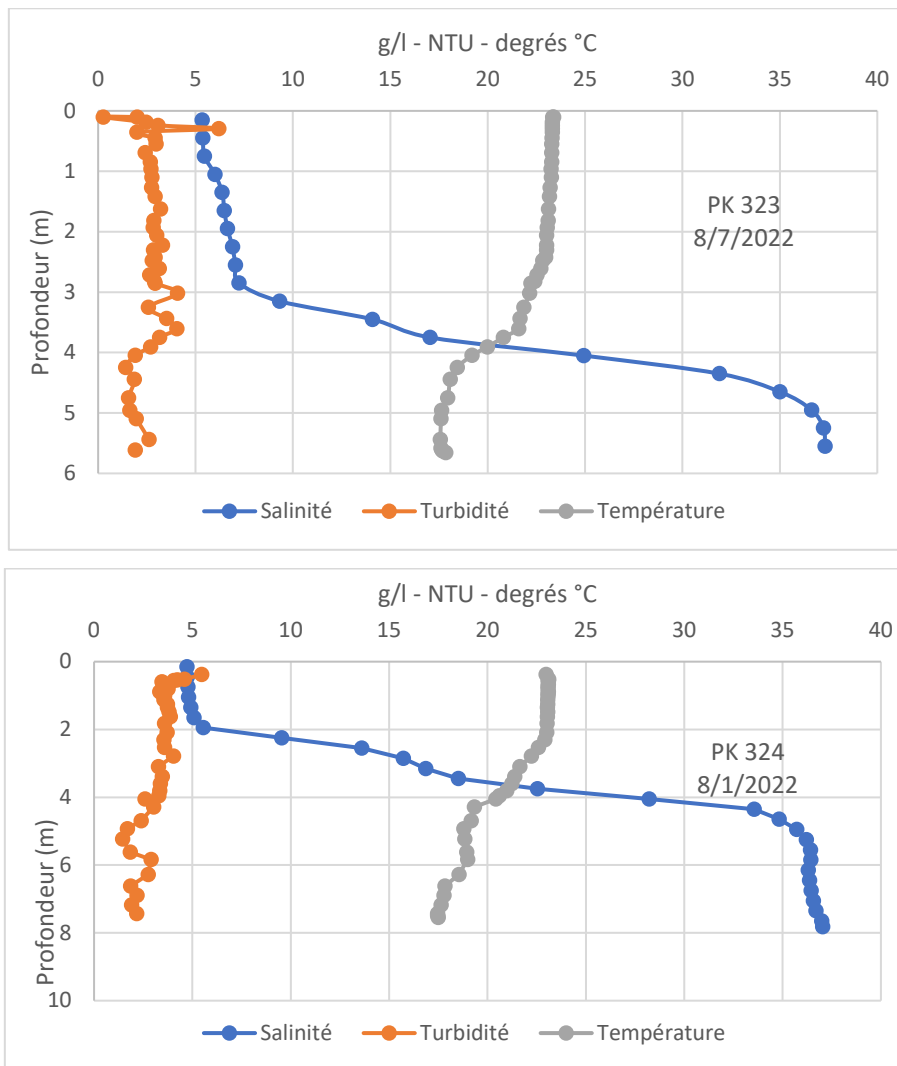


Figure 28: Profils de turbidité, température et salinité en Juillet 2022

En septembre 2022 la sonde Wisens de l'IRSN a permis d'acquérir 5 profils (Figure 29) sur une distance plus grande en remontant de Port Saint Louis (PK 322,5) jusqu'au maximum de l'intrusion (PK 299), mais malheureusement sans données CTD. La structure bicouche est toujours visible mais limitée là encore à des variations de quelques NTU, donc quelques mg/l. Elles traduisent cependant une légère différence dans les MES, notamment vers le PK 322.5, une différence qui existe peut-être aussi en termes granulométriques. Les variations au fond sont probablement dues au fait que la sonde à toucher le fond.

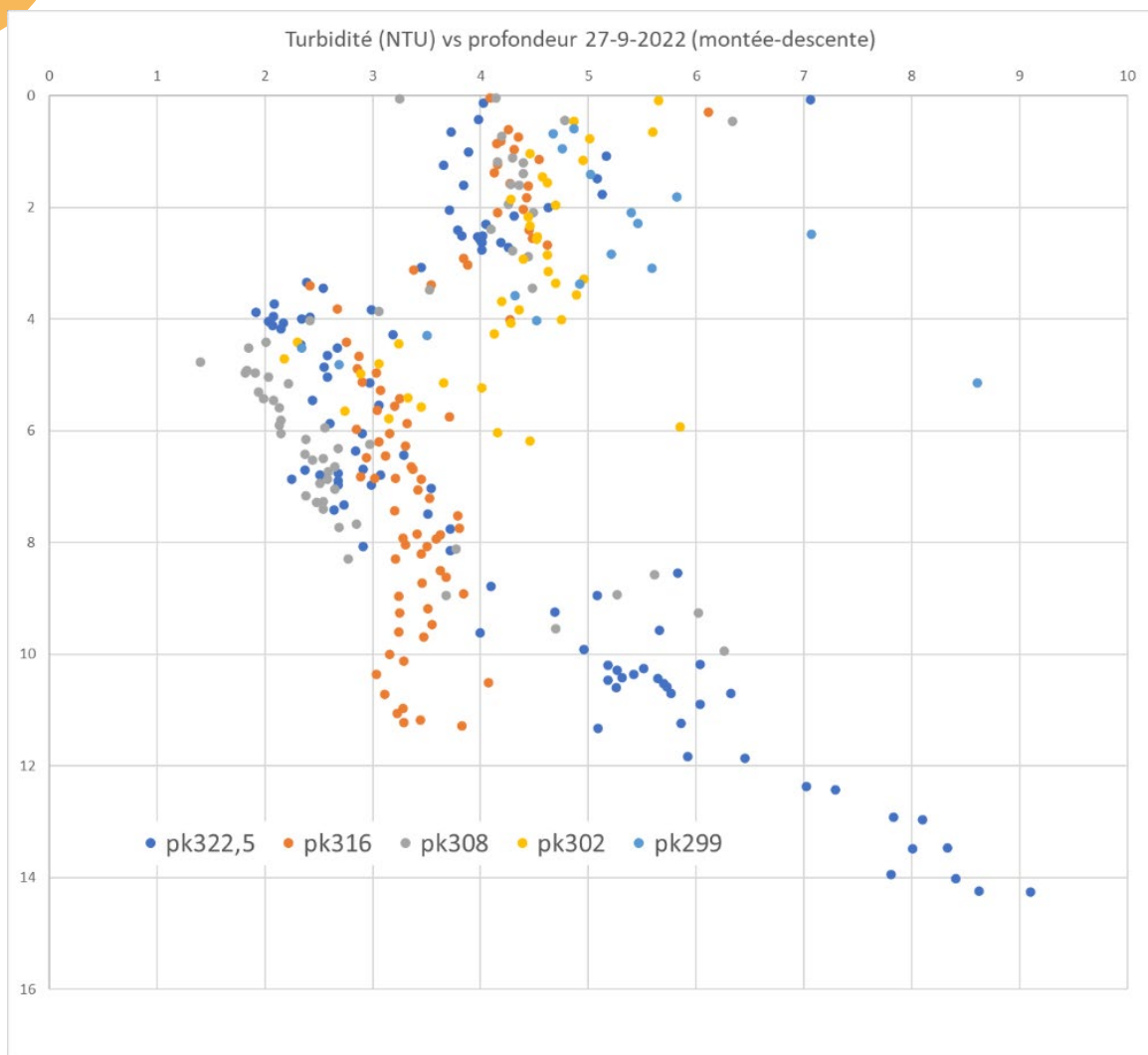


Figure 29: profils verticaux de turbidité (montée et descente) durant la campagne du 29 septembre 2022.

3.4 Synthèse

Les données recueillies lors des campagnes 2021 et 2022 viennent étayer les performances du modèle DRACAR pour reproduire le phénomène d'intrusion du coin salé dans le Rhône. Même si cette intrusion est aussi reliée aux effets de vents et de marée (Savey et al 1972) qui ne sont pas pris en compte ici, les restitutions de la structuration des couches eau douce et eau salée apparaissent convaincantes. De nouvelles mesures ciblant les débits entre 1200 et 1600 m³/s permettraient de mieux appréhender la mise en place du mécanisme.

4. Conclusion Générale

A l'issue de ces travaux de l'action A4 de l'OSR 6, les processus hydrodynamiques conduisant au développement de l'intrusion du coin salé dans le Grand Rhône sont mieux contraints. La mise en place de cette structure bicouche eau douce/eau salée en dessous de débits de 1700 m³/s peut-être désormais correctement modélisée.

Les processus hydro-sédimentaires qui induisent le dépôt des particules n'ont pas pu eux être abordés aussi précisément, car une seule campagne de mesure a pu être réalisée. Le déploiement s'est révélé en effet bien plus compliqué que prévu, car il s'est avéré impossible de réagir rapidement lors d'une montée de crue pour être en place sur le site avec différentes équipes éloignées (Aix, Lyon et Brest) et leurs appareillages techniques. Cependant, la suite de capteurs utilisée lors de cette campagne a montré qu'elle pouvait apporter de nouvelles informations à l'étude des particules en suspension. Ainsi, la combinaison innovante des capteurs optiques et acoustiques a permis de caractériser le spectre de taille des agrégats en suspension et leur densité effective. Les concentrations en particules étaient très homogènes verticalement et latéralement, avec une population bimodale en taille autour de 6 et 80 µm. La confrontation des concentrations volumiques et optiques a démontré, pour la première fois, que ces particules n'étaient pas des particules individuelles mais des agrégats, d'une densité effective 2 à 3 fois plus faibles que pour des particules individuelles.

Une autre forme de combinaison des données optiques et acoustiques a été testée pour évaluer la présence de sable en suspension. Le débit n'était toutefois suffisamment pas assez énergétique pour remettre en suspension des sables. Les estimations obtenues restent donc douteuses, mais techniquement la mesure se révèle faisable.

5. Bibliographie

Article de revue

Beverage, J. P. & Williams, D. T. (1989). Comparison - US P-61 and Delft sediment samplers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(2): 1702-1706

Boudet L., Sabatier F., Radakovitch O. (2017) Modelling of sediment transport pattern in the mouth of the Rhone delta: Role of storm and flood events. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 198, 568-582. <https://hal.science/OSR/hal-01765612v1>

Boudet L. (2017). Évolution de l'embouchure du Rhône dans le contexte du changement climatique. Modélisation et impacts sur la gestion de l'eau et des sédiments. Univ. Aix-Marseille.

Camenen, B., Dramais, G., Laible, J., Le Coz, J., Lauters, F. & Pierrefeu, G. (2023) Quantification of continuous sand flux time-series downstream of a dam during a flushing event. *Environmental Fluid Dynamics* (2023), doi : 10.1007/s10652-023-09955-9 <https://hal.inrae.fr/OSR/hal-04479755>

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

Delaval A., Duffa C., Piraud I., Radakovitch O. (2022). Dracar : an estuarine transfer function to predict dissolved pollutant fluxes to the sea. Application for radionuclides. *Advances in hydroinformatics?* Springer Water. 1115-1129. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1600-7_71

Dramais, G., Camenen B. & Le Coz, J. (2018). *Comparaison de méthodes pour la mesure des matières en suspension dans les cours d'eau, en présence de sable*. La Houille Blanche, 5-6: 96-105. doi: 10.1051/lhb/2018056. <https://hal.science/OSR/hal-02608048v1>

Ibañez C, Pont D, Prat N (1997) Characterization of the Ebre and Rhone estuaries: a basis for defining and classifying salt-wedge estuaries. *Limnol Oceanogr* 42(1):89–101. <https://doi.org/10.431/lo.1997.42.1.0089>

Marggraf, J., Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., Topping, D. J., Santini, W., Pierrefeu, G., Lauters, F. River suspended-sand flux computation with uncertainty estimation, using water samples and high-resolution ADCP measurements. *Earth Surface Dynamics*. (2024, under revision)

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

Sakho I., Dussouilliez P., Delanghe D., Hanot B., Raccasi G., Tal M., Sabatier F., Provansal M., Radakovitch O. (2019) Suspended sediment flux at the Rhone river mouth (France) based on ADCP measurements during flood events. *Environmental Monitoring Assessment*. 191, 8, Art 508. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7605-y>.

Savey P., Pommier M., Marvaud P. (1972) Observations et mesures effectuées sur les coins salés du grand et du petit Rhône. *La houille blanche*. 58, 2-3, 151-162. <https://doi.org/10.1051/lhb/1972011>.

Verney, R., Le Berre, D., Repecaud, M., Bocher, A., Bescond, T., Poppeschi, C., Grasso, F. (2024). Suspended particulate matter dynamics at the interface between an estuary and its adjacent coastal

sea: Unravelling the impact of tides, waves and river discharge from 2015 to 2022 in situ high-frequency observations. *Marine Geology* 107281. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2024.107281>

Rapport

BRL Ingénierie (2014). Etude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de « Basses eaux ». Document A – Rapport principal de phase 3.

Ghaffarian H., Piégay H., Seignemartin G., Arnaud F., Le Coz J. (2021). Analyse rétrospective de l'évolution contemporaine des niveaux d'eau dans les secteurs de Péage-de-Roussillon (PDR) et Donzère-Mondragon (DZM). Rapport Final. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5ème Programme d'Actions. <https://hal.science/OSR/hal-03293545>

Levasseur L., Doutriaux E. (1992). Le coin salé du Rhône et les travaux de creusement du seuil de Terrin. Rapport CNR.

Radakovitch O., Sakho I., Hanot B., Dussouillez P., Sabatier F., Sabatier-Delanghe D., Tal M. (2014) Mesure des apports en suspension du Rhône. Suivi de l'extension du coin salé dans le fleuve. Rapport final sur la validation et l'exploitation de l'équipement scientifique du Bac de Barcarin. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR). <https://hal.science/OSR/hal-03776829v1>

Radakovitch O., Delaval A., Boyer P., Duffa, C. Giner F., Mourier D. (2021) Transfert particulaire-dissous des radioisotopes à l'embouchure. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR). <https://hal.science/OSR/hal-03293536v1>

Sabatier F., Kulling B. (2015). Caractérisation et dynamique de la charge de fond à l'embouchure du Grand Rhône. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR). <https://hal.science/OSR/hal-03750058v1>

Thèse de doctorat / Mémoire de master

Bégorre C. (2021). Origine des matières en suspension et des sédiments déposés dans le bassin versant du Rhône : historique des apports et réactivité des traceurs. Thèse de Doctorat, Chimie environnementale, Université de Lyon – INRAE. <https://theses.hal.science/OSR/tel-03322601v1>

Gangloff A. (2017) Devenir des apports solides du Rhône dans le Golfe du Lion : étude de la dynamique du panache turbide du Rhône en réponse aux forçages hydrométéorologiques, Thèse de Doctorat, UBO Ifremer, 206p.

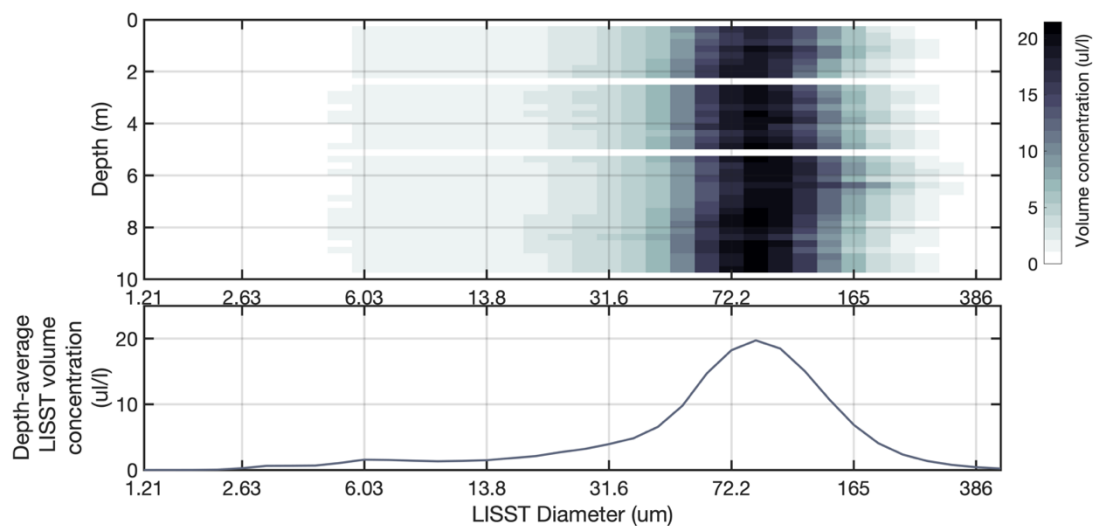
Marggraf, J. (2024). Improving methods for the hydroacoustic monitoring of suspended sand concentration and grain size: Application to the Isère River at Grenoble Campus. Thèse de Doctorat, MEGA Université de Lyon 1 – INRAE.

Verney R. (2019) Dynamiques de matières en suspension en zone côtière et estuarienne. Habilitation à diriger des recherches, Université de Bretagne Occidentale, 125p. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00748/86022/>

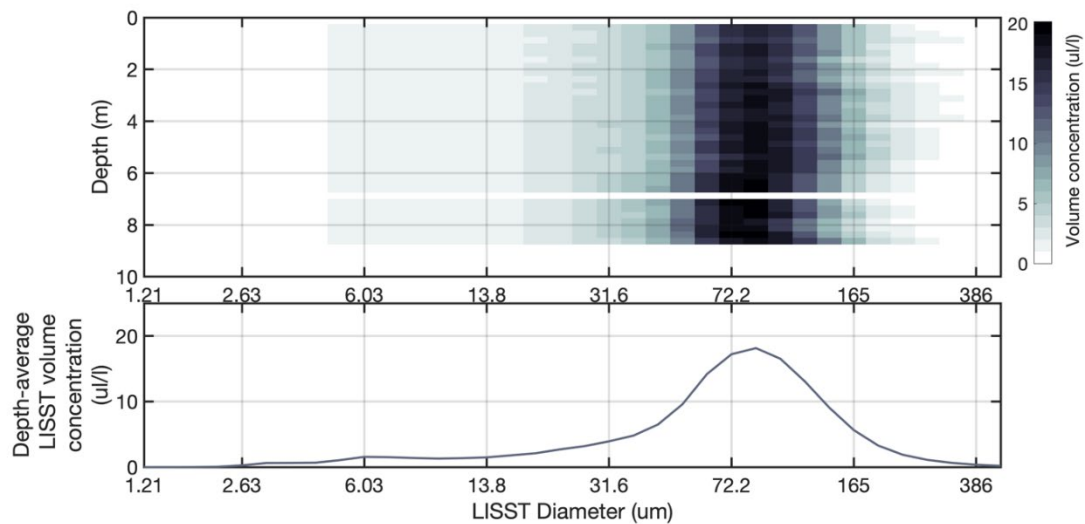
L. Boudet (2017) Modélisation du transport sédimentaire lié aux crues et aux tempêtes à l'embouchure du Rhône. Sciences de l'environnement. AMU - Aix Marseille Université; École Doctorale des Sciences de l'Environnement (ED251). <https://hal.science/OSR/tel-03323368v1>

6. Annexes

Annexe 1 – Profils verticaux des distributions en classe de taille issus des mesures LISST200X au PK320



Spectre en classe de taille des particules à la station RG85 (PK320). Haut : spectre en classe de taille le long de la colonne d'eau ; Bas : spectre moyenné sur la verticale



Spectre en classe de taille des particules à la station RG170 (PK320). Haut : spectre en classe de taille le long de la colonne d'eau ; Bas : spectre moyenné sur la verticale.



Observatoire des Sédiments du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers

