

**RAPPORT FINAL DU PROJET CAPTURE
(2021-2024)**

**VERS UNE CARACTERISATION ET PARAMETRISATION GLOBALE
DE LA TURBIDITE DANS LES ESTUAIRES
SOUS PRESSIONS ANTHROPIQUES ET CLIMATIQUES**

Coordination : Florent Grasso (Ifremer – DYNECO/DHYSED)

Collaborateurs : Bismuth E., Briche V., Buchet R., Burchard H., Daniel A., Defontaine S.,
Desroy N., Dessier A., Dijkstra Y., Fallou H., Geyer R., Jaouen E., Kösters F., Lafite R.,
Lebreton A., Lemoine J.P., Lepage M., Meunier F., Muntoni M., Orvain F., Reese L.,
Schmidt S., Schuttelaars H., Sottolichio A., Souchu P., Souissi S., Van Kessel T.,
Vanlede J., Van Maren B., Verney R., Walther R. & Zorndt A.

[Version 09/10/2024]

Appel à projets de recherche OFB 2020 dans le cadre de la mission inter-estuaires

*Fonctionnement et évolution des estuaires : traits généraux et spécificités de
ces socio-écosystèmes pour l'appui à la gestion*

RESUME

La turbidité, associée aux particules en suspension, est un paramètre clé du fonctionnement des estuaires, impactant les compartiments physiques, biologiques, biogéochimiques et écologiques de l'écosystème. Les niveaux de turbidité peuvent fortement varier d'un estuaire à l'autre, impliquant des stratégies de gestion spécifiques. Cependant, il est difficile d'estimer la turbidité attendue dans un estuaire sans avoir recours à des stratégies de mesures *in situ* et/ou de modélisations numériques coûteuses. De plus, il est compliqué de prévoir comment ces niveaux de turbidité peuvent évoluer face à des pressions anthropiques et climatiques.

L'objectif du projet CAPTURE est de proposer une méthode d'estimation de la turbidité estuarienne pouvant être simplement appliquée à partir de paramètres environnementaux facilement accessibles par les parties prenantes.

Pour atteindre cet objectif, le projet s'est basé sur la comparaison de différents estuaires tidaux européens (Gironde, Loire, Seine, Escaut, Ems, Weser et Elbe), via la combinaison d'observations *in situ* et de modélisations numériques réalistes. L'analyse des données a permis de mettre en avant une relation entre la turbidité estuarienne maximale et les forçages fluviaux et tidaux. Ainsi, en utilisant un nombre limité de paramètres estuariens (profondeur et largeur de l'estuaire) et de conditions de forçage (marnage et débit), il est possible d'estimer l'ordre de grandeur de la turbidité maximale pouvant être atteinte dans un estuaire à marée. Cette méthode a pu être validée sur d'autres estuaires présentant des caractéristiques contrastées (Charente, Vilaine, Hudson). De plus, cette approche a été utilisée pour estimer l'évolution potentielle de la turbidité maximale d'un estuaire face à des changements anthropiques (approfondissement du chenal principal) et climatiques (modification du débit du fleuve).

Enfin, le projet CAPTURE a apporté une conceptualisation globale de la turbidité dans les estuaires à marée. Cela permet de déterminer les réponses et les trajectoires potentielles des systèmes estuariens dans le cadre du changement global, mais aussi d'améliorer l'estimation de la turbidité estuarienne en soutien aux études écologiques et à la gestion de ces écosystèmes. La méthode développée dans le cadre de ce projet permet également de dégager des typologies d'estuaires en termes de turbidité potentielle, pouvant être reliées aux limitations de production primaire et aux risques d'hypoxie en estuaires.

Le projet CAPTURE (2021-2024) a été financé par l'Office Français de la Biodiversité (OFB) dans le cadre de la Mission Inter-Estuaires (MIE). Coordinné par l'Ifremer (DYNECO/DHYSED), CAPTURE a regroupé plus de 30 collaborateurs (scientifiques et gestionnaires) issues de 19 instituts (publiques et privés) de 5 pays.

SOMMAIRE

1. CONTEXTE	4
2. OBJECTIFS ET HYPOTHESES	5
3. METHODOLOGIE	6
4. DONNEES <i>IN SITU</i> ET SIMULATIONS NUMERIQUES INTER-ESTUAIRES	7
4.1. PRESENTATIONS DES DIFFERENTS ESTUAIRES	7
4.2. MESURES <i>IN SITU</i>	8
4.3. SIMULATIONS NUMERIQUES REALISTES	9
4.4. TRAITEMENT DES DONNEES	11
5. CONCEPTUALISATION INTER-ESTUAIRES DE LA TURBIDITE	11
5.1. CARACTERISATION DES ESTUAIRES	11
5.2. DYNAMIQUE HYDRO-SEDIMENTAIRE DES ESTUAIRES CAPTURE.....	15
5.3. CONCEPTUALISATION GLOBALE DE LA TURBIDITE ESTUARIEENNE.....	15
5.4. APPLICATION A D'AUTRES ESTUAIRES	20
6. ÉVOLUTION DE LA TURBIDITE DANS LE CADRE DU CHANGEMENT GLOBAL	22
6.1. EFFETS DE PRESSIONS ANTHROPIQUES SUR LA TURBIDITE.....	22
6.2. EFFETS DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA TURBIDITE	23
7. CONCLUSIONS & PERSPECTIVES	24
8. PRODUCTION SCIENTIFIQUE ISSUE DU PROJET CAPTURE	25
8.1. ARTICLES SCIENTIFIQUES	25
8.2. CONFERENCES SCIENTIFIQUES	25
8.3. JEUX DE DONNEES	25
9. REFERENCES	26
10. ANNEXE : ILLUSTRATION D'UN REJEU NUMERIQUE (MODELE <i>CURVILOIRE</i>)	30
11. ANNEXE : CARACTERISATION DES PROCESSUS HYDRO-SEDIMENTAIRES ESTUARIENS	32
12. ANNEXE : NOTE TECHNIQUE SUR LA METHODE D'ESTIMATION DU MAXIMUM DE TURBIDITE ESTUARIEENNE (ESTUMAX)	33
13. ANNEXE : NOTE TECHNIQUE SUR LES DONNEES ESTUARIENNES DISPONIBLES	35
13.1. ARCHITECTURE DU DOSSIER CAPTURE.....	35
13.2. TRAITEMENT DES SORTIES DE MODELES	36
13.3. TRAITEMENT DES DONNEES MEASUREES	41

1. CONTEXTE

La turbidité est un paramètre environnemental clé du fonctionnement des écosystèmes estuariens, impactant les compartiments biologique, biogéochimique et écologique (ex. limitation de la production primaire et du développement du phytoplancton, microphytobenthos, macrophytes, transport ou stockage des nutriments et contaminants, perturbation des espèces benthiques et pélagiques) [Morris *et al.*, 1978; Billen *et al.*, 2007; Wei *et al.*, 2022]. Cela se traduit par la prise en compte de la turbidité, ou de la concentration en matières en suspension (MES), pour la caractérisation et la gestion des écosystèmes estuariens (Figure 1). La turbidité est par exemple utilisée pour la définition et le calcul de nombreux indicateurs du Bon État Écologique (BEE) des eaux de transition dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). Dans les milieux estuariens très turbides, ce paramètre impacte les indicateurs « invertébrés benthiques » et « microphytobenthos » pour les éléments de qualité biologique, l'indicateur « oxygène » pour les éléments de qualité physicochimique, et l'indicateur « hydro-morpho-sédimentaire (HMS) » pour les éléments de qualité hydromorphologique. De plus, le niveau de MES vient directement impacter les échanges dissous et particulaires le long du continuum terre-mer (*i.e.* flux entrant/sortant).

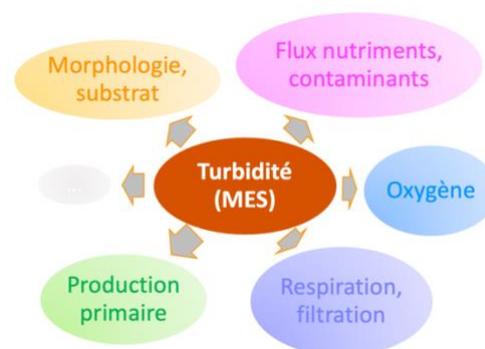


Figure 1. Influence de la turbidité (ou MES) sur le fonctionnement des écosystèmes.

Cependant, ce paramètre reste difficile à estimer dans ces milieux complexes : (i) l'imagerie satellite, couvrant seulement les couches de surface de l'eau, est limitée pour cartographier l'intérieur des estuaires [Doxaran *et al.*, 2009] ; (ii) les mesures *in situ* n'apportent que des informations ponctuelles difficiles à spatialiser [Jalón-Rojas *et al.*, 2015; Jalón-Rojas *et al.*, 2016; Verney *et al.*, 2024] ; et (iii) la modélisation numérique réaliste est coûteuse et donc difficile à implémenter systématiquement pour les plus petits estuaires [Grasso *et al.*, 2018; Diaz *et al.*, 2020; Grasso and Caillaud, 2023b].

De plus, les milieux estuariens sont soumis aux forçages hydrométéorologiques (ex. apports liquides et solides amont, vent, vagues, marée), et par leur situation à l'interface entre les bassins versants et les mers côtières, sont particulièrement sujets aux pressions anthropiques (ex. aménagements portuaires, dragages) [Avoine *et al.*, 1981; Cox *et al.*, 2021; Grasso *et al.*, 2021]. Ces différents forçages peuvent avoir des impacts forts sur les niveaux de turbidités observés dans les estuaires [Allen *et al.*, 1980; van Maren *et al.*, 2015a; Burchard *et al.*, 2018; Grasso and Le Hir, 2019], induisant des concentrations de sédiments en suspension de quelques mg/l à plusieurs g/l (Figure 2). Les sédiments remis en suspension peuvent former une masse sédimentaire très concentrée, appelée « bouchon vaseux », qui peut fortement varier d'un estuaire à l'autre (ex. ~0,3 MT en Seine et ~4 MT en Gironde) [Avoine *et al.*, 1981; Castaing and Allen, 1981]. La présence du bouchon vaseux vient directement impacter l'ensemble des processus morpho-sédimentaires, biogéochimiques et écologiques des estuaires. De plus, il a été observé au cours des dernières décennies que l'approfondissement des chenaux de navigation a engendré des mécanismes de rétroactions hydro-sédimentaires transformant des estuaires « normaux » en estuaires « hyper-turbides » (ex. estuaires de la Loire ou de l'Ems) [Winterwerp and Wang, 2013; Winterwerp *et al.*, 2013]. Ce type de transition peut fortement modifier les services et fonctions écosystémiques de ces milieux estuariens, et a également d'importantes répercussions sur les méthodes de gestion à adopter pour ces environnements très anthropisés [Fettweis *et al.*, 2010; Petit *et al.*, 2013; Coynel *et al.*, 2016].

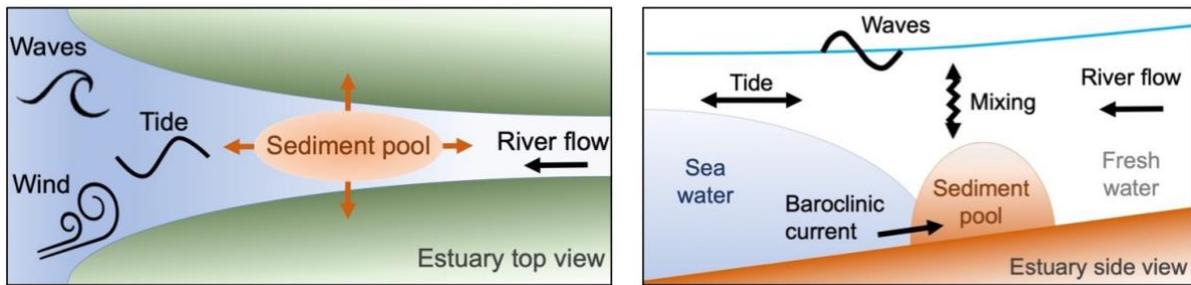


Figure 2. Représentation schématique des principaux forçages (gauche) et mécanismes (droite) impactant la dynamique hydro-sédimentaire des estuaires. Figure de droite modifiée d'après Burchard et al. [2018].

2. OBJECTIFS ET HYPOTHESES

Le principal objectif du projet CAPTURE est de proposer une **conceptualisation du maximum de turbidité dans les estuaires** à marée (**ESTUMAX**), afin de **déterminer les réponses et les trajectoires de ces systèmes face aux pressions anthropiques et climatiques** (*i.e.* modifications morphologiques et des apports amont). Ces connaissances visent à améliorer l'estimation de la turbidité estuarienne, en soutien : aux études écologiques, à la quantification des indicateurs propres à la définition du BEE des eaux de transition, et à la gestion de ces écosystèmes. La **méthode de caractérisation systématique ESTUMAX** a également pour but de dégager des **typologies d'estuaires** en termes de **turbidité potentielle** pouvant s'appliquer aux « plus petits » estuaires moins documentés.

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de simplifier la complexité des milieux estuariens en se focalisant sur les forçages dominants. Nous considérons donc que la turbidité maximale observée dans les estuaires à marée est au premier ordre induite par la combinaison des courants de marée, des apports amont (*i.e.* débits liquides des fleuves) et de la morphologie des estuaires [Grasso et al., 2018] (Figure 3). De plus, il est considéré que la distribution de la turbidité le long du talweg d'un estuaire est représentative de la dynamique estuarienne principale [Grasso and Le Hir, 2019]. Nous suivons donc une approche 1DH (une dimension horizontale) allant de la mer côtière à l'aval jusqu'au fleuve à l'amont. Enfin, les effets biotiques (ex. végétation, faune benthique, matière organique) ne sont pas pris en compte dans cette étude abiotique. A savoir que les effets biotiques peuvent avoir un impact secondaire sur la dynamique de la turbidité, comme par exemple l'influence du phytoplancton sur l'évolution de la vitesse de chute des sédiments fins [ex. Horemans et al., 2021].

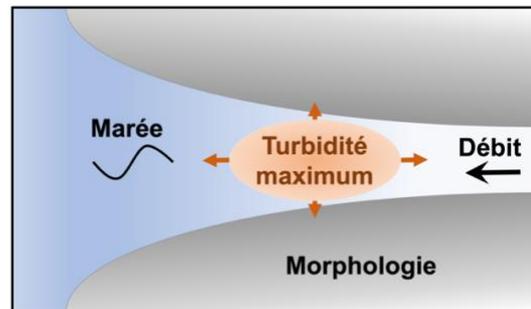


Figure 3. Simplification des forçages impactant le maximum de turbidité.

Vis-à-vis des attentes de l'OFB, ce projet contribue au développement d'une vision globale des systèmes estuariens, afin de fournir une aide au diagnostic de l'état de ces milieux et d'émettre des recommandations de gestion et de restauration de leurs principales fonctions écologiques. CAPTURE s'inscrit pleinement dans l'activité 6 « Recherche et développement au service de l'action » et contribue notamment aux objectifs 6.1 et 6.2 du contrat d'objectifs et de performance de l'AFB, devenu OFB.

3. METHODOLOGIE

Le projet se base sur la comparaison de sept estuaires européens bien documentés via la combinaison d'analyse de mesures *in situ* et de simulations numériques réalistes : estuaires de la Gironde, la Loire et la Seine (France), l'Escaut (*Scheldt*, Belgique/Pays-Bas), l'Ems (Pays-Bas/Allemagne), la Weser et l'Elbe (Allemagne) (Figure 4). Les connaissances acquises sur ces estuaires permettent ensuite d'en déduire une loi de comportement pouvant s'appliquer à d'autres systèmes moins connus et ne disposant pas de moyens suffisant pour développer des études spécifiques.

L'approche suivie dans CAPTURE vise à proposer une méthode d'estimation de la turbidité à partir de variables intégrées et facilement accessibles par les gestionnaires des milieux estuariens et côtiers. Elle a l'intérêt d'être générique pour s'appliquer plus aisément à une grande variété de systèmes estuariens. Cependant, elle a le désavantage de ne pas être aussi précise qu'une approche spécifique à un site donné (ex. déploiement d'un réseau de mesures *in situ* et/ou développement d'une configuration numérique dédiée au site étudié).

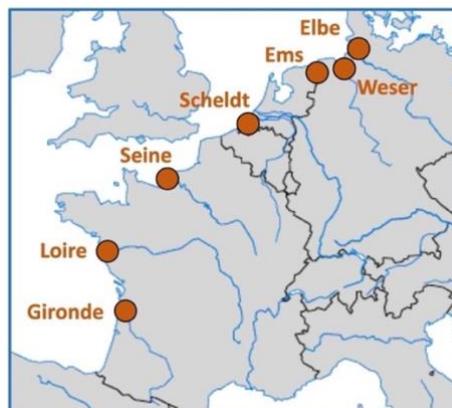


Figure 4. Estuaires étudiés dans le cadre du projet.

Le projet est structuré en deux tâches principales (Figure 5) :

- La tâche 1 « *Conceptualisation inter-estuaires de la turbidité* » (Section 5) a pour principal objectif d'aboutir à une méthode d'estimation du maximum de turbidité estuarienne (ESTUMAX), en lien avec les forçages dominants. La conceptualisation et le développement de cette méthode se base sur l'analyse de mesures *in situ* et de simulations numériques en comparant les sept estuaires européens contrastés (Figure 4).
- La tâche 2 « *Évolution de la turbidité dans le cadre du changement global* » (Section 6) a deux principaux objectifs : (i) de définir et quantifier les métriques sédimentaires pertinents pour l'étude des écosystèmes estuariens, et (ii) d'estimer comment seraient amenés à évoluer ces métriques dans le cadre du changement global.

Pour atteindre ces objectifs, différents groupes de travail ont été mis en place (Tableau 1), et animés par l'organisation de réunions et workshops :

- Un groupe « *Projet* », réunissant des scientifiques et gestionnaires, d'instances publiques et privées, ayant pour but de suivre l'avancée des travaux et de discuter des attentes plus opérationnelles pour appliquer les méthodes développées à différents systèmes estuariens.
- Un groupe « *Hydro-sédimentaire* », réunissant des scientifiques internationaux, d'instances publiques et privées, ayant pour but de mettre en commun leurs connaissances et expertises sur la dynamique hydro-sédimentaire estuarienne, afin d'aboutir à la conceptualisation inter-estuaire de la turbidité.
- Un groupe « *Interdisciplinaire* », réunissant des scientifiques travaillant sur diverses thématiques associées aux différents compartiments des écosystèmes estuariens (physique, biologique, biogéochimique et écologique), ayant pour but de définir les attentes sur les caractéristiques et métriques sédimentaires nécessaires à la bonne compréhension de leurs sujets d'étude.

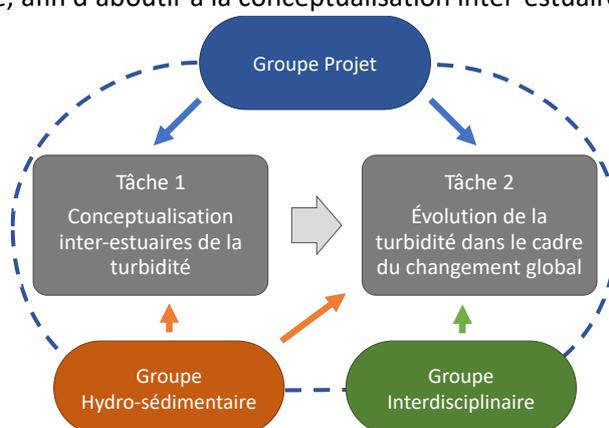


Figure 5. Schéma organisationnel du projet.

Tableau 1. Groupes de travail mis en place dans le projet CAPTURE, impliquant plus de 30 personnes (scientifiques + gestionnaires) issues de 19 instituts (publiques + privés) de 5 pays.

Groupe "Projet "			Groupe "Hydro-sédimentaire "			Groupe "Interdisciplinaire "		
Nom	Structure	Expertise	Nom	Structure	Expertise	Nom	Structure	Expertise
Bismuth E.	Ifremer - DYNECO	Gestion de données (CDD CAPTURE)	Bismuth E.	Ifremer - DYNECO	Gestion de données (CDD CAPTURE)	Buchet R.	Ifremer - VIGIES	Réf. Ifremer DCE
Briche V.	SMIDDEST	Anim. SAGE Gironde	Burchard H., Reese L.	IOW (Allemagne)	Réf. Elbe	Daniel A.	Ifremer - DYNECO	Biogéochimie
Buchet R.	Ifremer - VIGIES	Réf. Ifremer DCE	Defontaine S.	Ifremer - DYNECO	Modèle idéalisé (Postdoc INSPECT)	Desroy N.	Ifremer - UL	Ecologie benthique
Dossier A., Jaouen E.	PNM Gironde - Pertuis (OFB)	Milieux aquatiques	Geyer R.	WHOI (USA)	Réf. Circulation estuarienne	Grasso F.	Ifremer - DYNECO	Hydro-sédimentaire, resp. projet
Fallou H.	GIP Loire Estuaire	Réf. réseau SYVEL (Loire)	Grasso F.	Ifremer - DYNECO	Resp. projet	Lafite R.	UMR M2C	Sédiment/Matière organique
Grasso F.	Ifremer - DYNECO	Hydro-sédimentaire, resp. projet	Lafite R.	UMR M2C	Réf. Seine	Lepage M.	INRAE	Ecologie pélagique (poissons)
Lafite R.	UMR M2C	Hydro-sédimentaire, réf. Seine	Schuttelaars H., Dijkstra Y.	Univ. Delft (Pays-Bas)	Modélisation idéalisée	Muntoni M.	GIP Seine-Aval	Ecologie de la restauration
Lebreton A.	EPTB Vilaine	Réf. Vilaine	Sottolichio A.	UMR EPOC	Réf. Gironde	Orvain F.	UMR BOREA	Ecologie benthique (µphyto)
Lemoine J.-P.	GIP Seine-Aval	Réf. réseau SYNAPSES (Seine)	Van Kessel T.	DELTARES (Pays-Bas)	Réf. Escaut aval	Sottolichio A.	UMR EPOC	Indicateurs hydro-morpho-sédim.
Meunier F.	EPTB Charente	Milieux aquatiques	Van Maren B.	DELTARES (Pays-Bas)	Réf. Ems	Souchu P.	Ifremer - UL	Eutrophisation
Schmidt S.	UMR EPOC	Réf. réseau MAGEST (Gironde)	Vanlede J.	Flanders Hyd. (Belgique)	Réf. Escaut amont	Souissi S.	UMR LOG	Ecologie pélagique (zooplancton)
Sottolichio A.	UMR EPOC	Hydro-sédimentaire, réf. Gironde	Walther R.	ARTELIA	Réf. Loire			
Verney R.	Ifremer - DYNECO	Hydro-sédimentaire, réseaux de mesure	Zorndt A., Köster F.	BAW (Allemagne)	Réf. Weser			
Walther R.	ARTELIA	Hydro-sédimentaire, réf. Loire						

Un contrat d'un an financé par le projet CAPTURE (CDD E. Bismuth) a permis de rassembler, préparer et prétraiter l'ensemble des données d'observations *in situ* et de simulations numériques disponibles sur les sept estuaires, afin d'en faire leur analyse (Annexe 13). En complément, un travail exploratoire basé sur un modèle numérique d'estuaire idéalisé (*iFlow*, [Dijkstra et al., 2017]) a été mené dans le cadre du contrat postdoctoral Ifremer INSPECT de S. Defontaine [Defontaine et al., submitted].

4. DONNEES *IN SITU* ET SIMULATIONS NUMERIQUES INTER-ESTUAIRES

4.1. PRESENTATIONS DES DIFFERENTS ESTUAIRES

Les sept estuaires étudiés dans le cadre de ce projet (Figure 4, Tableau 2) ont été sélectionnés sur la base de plusieurs critères :

- Estuaires européens (concernés par la Directive Cadre sur l'Eau).
- La présence de bouchons vaseux de différentes intensités.
- La variabilité des forçages fluviaux et tidaux (conditions semi-diurnes dans le domaine meso- à macro-tidal).
- Des morphologies contrastées.
- La disponibilité de mesures *in situ* à haute-fréquence (*i.e.* acquisition toutes les 5-30 minutes) et de simulations numériques réalistes validées à l'échelle annuelle.

Cela se traduit par des estuaires d'environ 50 à 200 km de long, correspondant à des longueurs relatives d'environ 0,5 à 2 (*i.e.* longueur de l'estuaire sur longueur d'onde de la marée, L_e/L_t). Les marnages TR médians mesurés aux embouchures des estuaires varient entre 2,7 m (Weser) et 5,3 m (Seine). Les débits liquides Q médians fluctuent de 59 m³/s (Ems) à plus de 800 m³/s (Loire et Elbe). Il en résulte un facteur 10 sur les concentrations en MES à la surface, allant d'environ 0,5 g/l (Elbe, Weser et Escaut) à plus de 5 g/l (Gironde et Ems). Plus de détails sont disponibles dans le Tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques des estuaires étudiés dans le cadre du projet, à partir des mesures *in situ* disponibles sur les années spécifiées, et références des simulations numériques utilisées.

	Elbe (2013)	Weser (2016)	Scheldt (2006)	Seine (2016)	Loire (2018)	Gironde (2015)	Ems (2005)
Longueur estuaire (km) (> lim. grad. sal. : L_e)	160 (122)	120 (64)	160 (102)	170 (152)	100 (82)	150 (116)	60 (32)
Longueur tidale : L_t	94	81	71	80	66	64	54
Longueur relative : L_e/L_t	1.3	0.8	1.4	1.9	1.2	1.8	0.6
Marnage 'TR' (m) Médiane [perc ₅ – perc ₉₅]	2.8 [2.0 – 3.3]	2.7 [2.0 – 3.3]	3.8 [2.7 – 4.7]	5.4 [3.3 – 7.3]	3.5 [1.9 – 5.1]	3.3 [1.9 – 4.7]	3.1 [2.4 – 3.6]
Débit liquide (m ³ /s) Moyenne, Médiane [perc ₅ – perc ₉₅]	1074, 883 [460 – 2087]	270, 231 [102 – 666]	99, 84 [42 – 223]	602, 470 [245 – 1332]	872, 645 [146 – 2495]	619, 380 [154 – 1690]	71, 59 [29 – 154]
Débit solide moyen (MT/yr)	0.5	0.4	0.6	0.5	1.1	2.8	/
MES [perc ₉₅] (kg/m ³)	0.5	0.5	0.4	1.1	2.9	5.1	6.1
Référence modèle	<i>Reese et al.</i> [2024]	<i>Hesse et al.</i> [2019]	<i>Van Kessel et al.</i> [2011a]	<i>Grasso et al.</i> [2021]	<i>Grasso & Caillaud</i> [2023b]	<i>Diaz et al.</i> [2020]	<i>Van Maren et al.</i> [2015b]

4.2. MESURES *IN SITU*

Les réseaux de mesures en continu à haute fréquence (toutes les 5-30 minutes) déployés dans les estuaires sont exploités afin de caractériser l'évolution de la turbidité *in situ* pour différentes configurations morphologiques et environnementales, mais également pour valider les concepts déduit des simulations numériques réalistes (Section 4.3). Dans les estuaires français, nous utilisons les données du réseau MAGEST en Gironde [*Jalón-Rojas et al., 2015; Schmidt et al., 2016*], du réseau SYVEL en Loire [*GIP Loire Estuaire; Jalón-Rojas et al., 2016*], du réseau SYNAPSES en Seine [*GIP Seine-Aval and GPM Rouen; Druine et al., 2018*] (Figure 6). Pour les autres estuaires européens, nous utilisons les données de Flanders Hydraulics pour l'Escault, la base de données [INTERTIDE](#) pour l'Ems, et la base de données allemande www.kuestendaten.de pour l'Elbe. Pour l'estuaire de la Weser, nous utilisons les données collectées par le *Federal Waterways and Shipping Administration*, fournies par le *Federal Waterways Engineering and Research Institute*. A savoir que les stations de mesures sont pour la majorité localisées en bordure des fleuves (pontons), pouvant induire une surestimation par rapport à la turbidité observée dans les chenaux plus profonds. Nous utilisons également les données des marégraphes gérés par les services nationaux (ex. SHOM, Rijkswaterstaat) et les ports présents dans les estuaires.

Le nombre de stations de mesures varie d'un estuaire à l'autre (Figure 7 et Figure 8), ainsi que le positionnement de la mesure dans la colonne d'eau (ex. surface, fond). Cependant, nous disposons à minima d'une information proche de la surface dans la zone de turbidité maximale dans chaque estuaire. Cette donnée de surface représente une donnée pertinente pour caractériser la dynamique des bouchons vaseux, mais également pour estimer l'atténuation de la lumière dans la colonne d'eau, et donc la limitation potentielle de la production primaire.

Plus d'informations sur les caractéristiques des mesures et de leur traitement sont disponibles dans l'Annexe 13.



Figure 6. Station de mesures du réseau SYNAPSES en estuaire de Seine [*GIP Seine-Aval and GPM Rouen*]. Photo J.P. Lemoine.

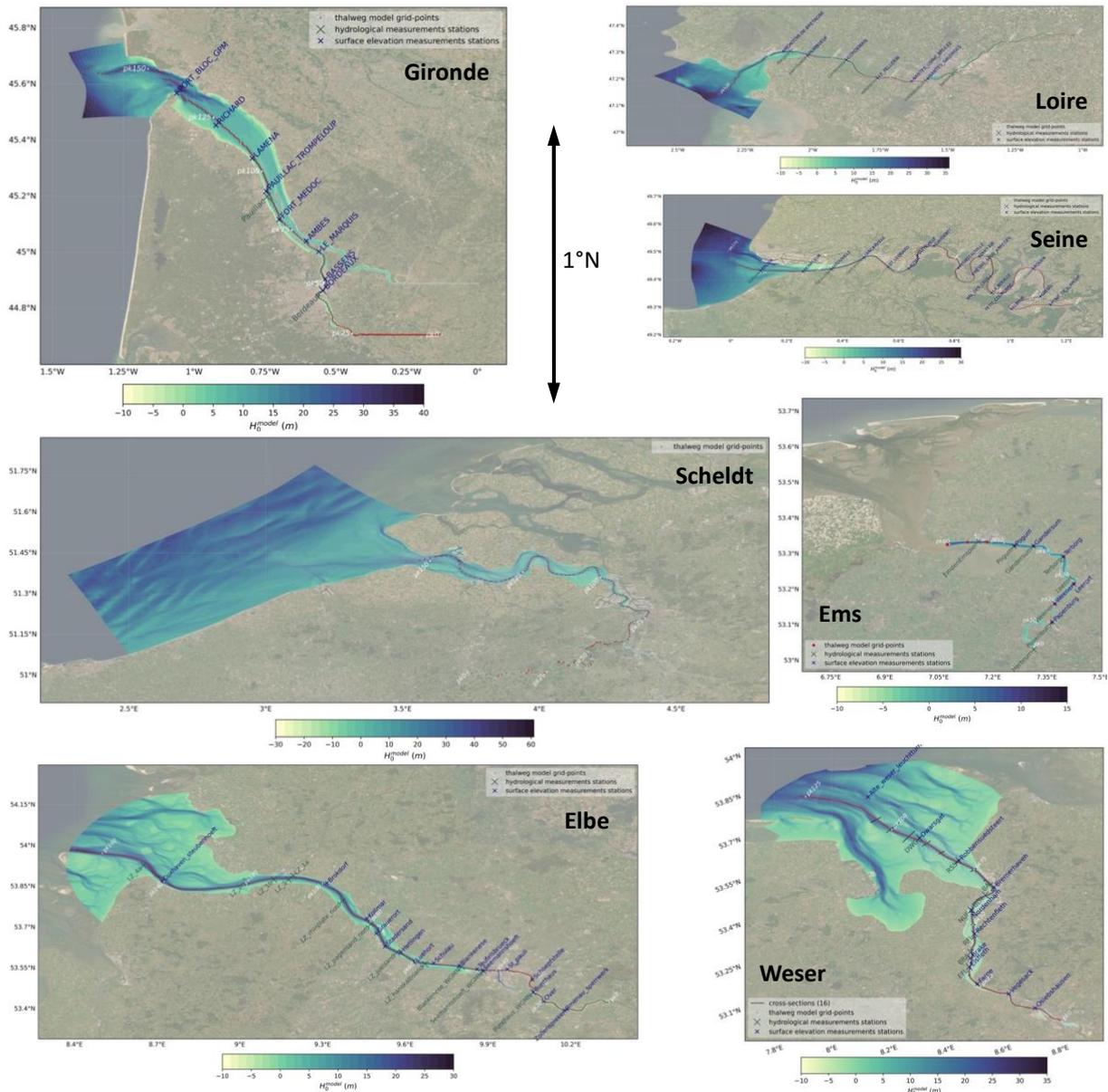


Figure 7. Illustration des configurations numériques, et des stations de mesures des niveaux d'eau (x) et des concentrations en MES (X). Les profils longitudinaux (le long du talweg) utilisés pour l'analyse 1DH sont représentés en rouge. Les stations sur l'Escaut (Scheldt) ne sont pas illustrées sur cette figure. Les configurations sont détaillées dans l'Annexe 13 (Figure 31 à Figure 37).

4.3. SIMULATIONS NUMERIQUES REALISTES

En plus des mesures *in situ*, les simulations numériques réalistes (*i.e.* bathymétrie et forçages réalistes) apportent des informations complémentaires et spatialisées sur les systèmes estuariens. Ces rejeux numériques (ou *hindcast*), validés à partir d'observations, permettent de décrire la dynamique hydro-sédimentaire de l'ensemble de la colonne d'eau sur des échelles spatiales étendues (Figure 7). Dans le cas des estuaires français, nous avons utilisés les résultats issus d'une combinaison de modèles pour l'hydrodynamique (MARS3D, [Lazure and Dumas, 2008]), les vagues (WAVEWATCH III®, [Roland and Arduin, 2014]) et les sédiments (MUSTANG, [Le Hir et al., 2011; Grasso et al., 2015]). Ces modèles ont été déployés et validés sur les estuaires de la Seine [Grasso et al., 2018], de la Gironde [Diaz et al., 2020] et de la Loire [Grasso and Caillaud, 2023b], et les rejeux numériques mis à disposition ont été exploités dans le cadre de ce projet [Grasso et al., 2019; Diaz et al., 2023; Grasso and Caillaud, 2023a] (exemple des simulations du rejeu *CurviLoire* illustrées en Annexe 10, Figure 23 et Figure 24).

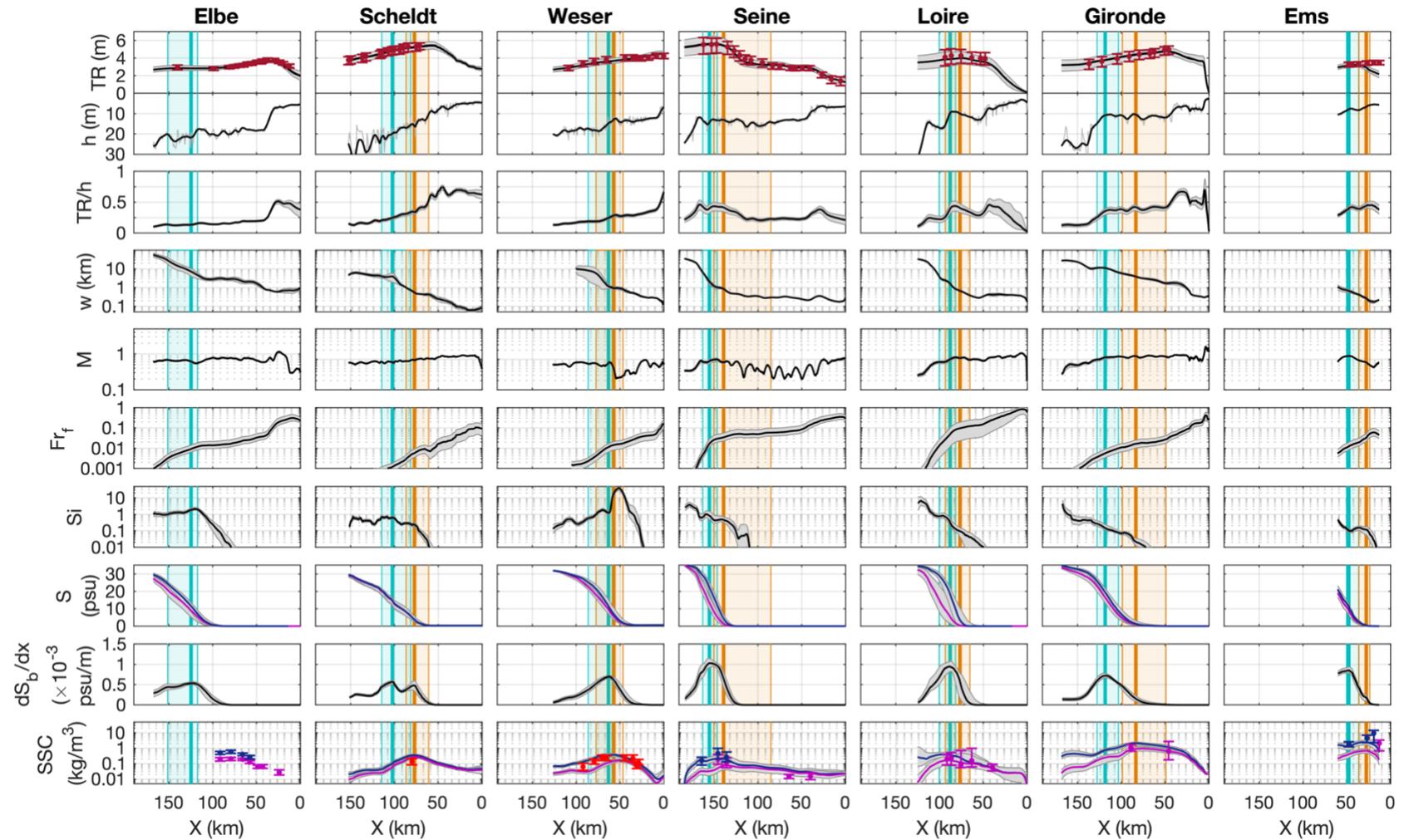


Figure 8. Évolution longitudinale (1DH le long du thalweg) des grandeurs caractéristiques de la physique estuarienne, simulée (lignes) et observée (symboles), pour les sept estuaires. De haut en bas : marnage TR, profondeur d'eau h , marnage relatif TR/h, largeur w , nombre de mélange M , nombre de Froude Fr_f , nombre de Simpson Si , salinité S de fond (bleu) et de surface (magenta), gradient horizontal de salinité de fond dS_b/dx , et concentration des matières en suspension SSC de fond (bleu), de surface (magenta) et au milieu de la colonne d'eau (rouge). Médiane (trait épais) et percentiles 25/75 (zone grisée) sur un an. Les zones bleutées et orangées représentent respectivement les extensions du gradient de salinité et du bouchon vaseux.

Pour l'estuaire de l'Escaut, nous utilisons les simulations numériques de *van Kessel et al.* [2011a] qui s'appuient sur le modèle hydrodynamique SIMONA/TRIWAQ [*Roest et al.*, 1995], le modèle de vagues SWAN [*Booij et al.*, 1996, www.swan.tudelft.nl] et le modèle sédimentaire DELFT3D-WAQ [*van Gils et al.*, 1993; *Postma and Hervouet*, 2007], modifié et détaillé par *van Kessel et al.* [2011b]. Pour l'estuaire de l'Ems, nous utilisons les simulations de *van Maren et al.* [2015b], utilisant la suite de modélisation DELFT3D [*Lesser et al.*, 2004]. Nous utilisons la simulations r19 pour l'hydrodynamique et la simulation r58 pour la dynamique sédimentaire. Pour l'estuaire de la Weser, nous utilisons les simulations réalisées par le *Federal Waterways Engineering and Research Institute*, basées sur le modèle UnTRIM2 [*Kösters and Zorndt*, 2018; *Hesse et al.*, 2019]. Enfin, nous utilisons pour l'estuaire de l'Elbe les simulations de *Reese et al.* [2024], s'appuyant sur le modèle GETM [*Burchard and Bolding*, 2002]. A noter que seules les simulations hydrodynamiques et hydrologiques sont disponibles pour l'Elbe (dynamique sédimentaire en cours d'implémentation et de validation).

Ces simulations numériques disposent d'une résolution spatiale fine dans les estuaires (taille de mailles inférieure à 100 m) et une résolution temporelle allant de 10 à 60 minutes. Plus d'informations sur les simulations et leur traitement sont disponibles dans l'Annexe 13.

4.4. TRAITEMENT DES DONNEES

Les données issues d'observation *in situ* et de modélisation numérique sont traitées et analysées par cycle de marée (Annexe 13), *i.e.* les informations sont moyennées sur des périodes de 12,4 h et nous ne cherchons pas à caractériser la dynamique intra-tidale (ex. flot/jusant). Les paramètres étudiés (ex. hauteur d'eau, courant, salinité, concentration en MES) sont quantifiés pour chaque cycle de marée par leurs valeurs moyennes et médianes. Les minima et maxima sont caractérisés par différents percentiles (ex. 5, 10, 25, 75, 90, 95).

De plus, l'évolution de ces paramètres est analysée au regard des conditions de forçage (ex. marnage, débit liquide) au cours des cycles tidaux (*i.e.* vives eaux/mortes eaux) et hydrologiques (*i.e.* crues/étiages). Dans cette étude, nous ne cherchons pas à caractériser l'effet du vent et des vagues sur la dynamique hydro-sédimentaire, en faisant l'hypothèse que ces forçages agissent au deuxième ordre sur les estuaires concernés [*Grasso et al.*, 2018].

5. CONCEPTUALISATION INTER-ESTUAIRES DE LA TURBIDITE

5.1. CARACTERISATION DES ESTUAIRES

Définition des limites estuariennes

La définition des limites d'un estuaire ne fait pas encore l'objet d'un consensus car cela dépend des objets d'études, des thématiques et des questionnements scientifiques. *Pritchard* [1967] se basait principalement sur la distribution de la salinité, allant de la limite d'intrusion saline en amont jusqu'aux zones en aval présentant 95% de la salinité marine pour 95% du temps (Figure 9). Cependant, cette définition n'inclut pas les zones en amont de l'intrusion saline où la marée est encore présente (ex. rivière tidale), pouvant présenter de fortes turbidités. Cela est par exemple le cas du bouchon vaseux girondin remontant dans la Garonne en étiage [*Sottolichio and Castaing*, 1999; *Jalón-Rojas et al.*, 2015]. Ainsi, il a été proposé d'étendre la limite amont d'un estuaire à la limite d'influence de la marée [*Elliott and McLusky*, 2002]. La limite aval d'un estuaire est souvent définie sur la base d'appréciation morphologique (*i.e.* embouchures plus ou moins marquées), mais cela manque de critères objectifs permettant de comparer de manière cohérente différents systèmes. Enfin, d'un point de vue biologique, une zone estuarienne peut aussi être définie par la présence d'une espèce de plancton d'origine marine ou par la présence de poissons vivant dans des eaux saumâtres.

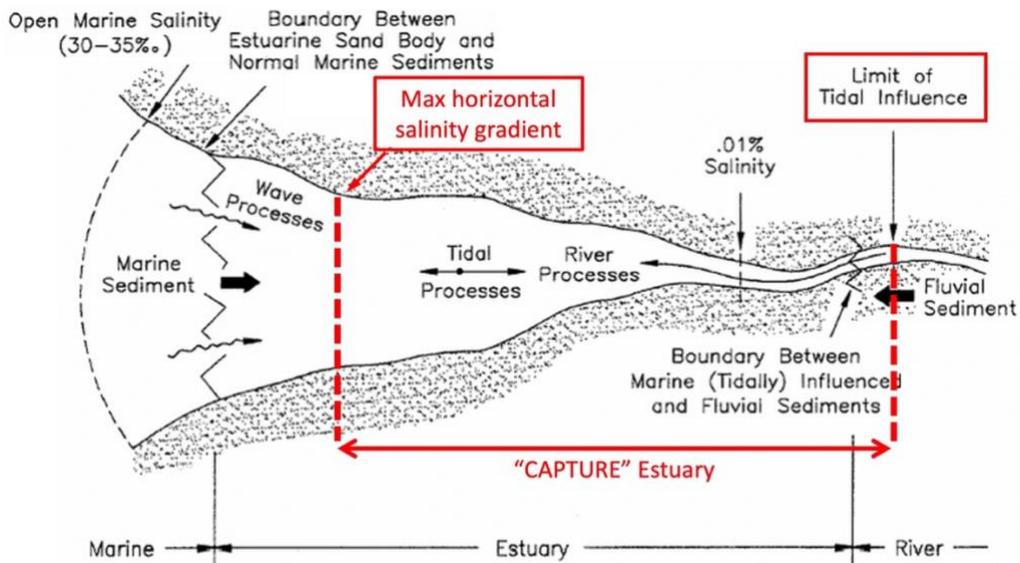


Figure 9. Représentation schématique des limites estuariennes utilisées dans ce projet (rouge). Figure modifiée d'après Dalrymple et al. [1992].

Dans le cadre de ce projet, nous suivons une approche basée sur le fonctionnement physique des estuaires, prenant en compte les processus responsables de la dynamique estuarienne [Geyer and MacCready, 2014]. Pour cela, nous déterminons la limite amont comme la limite d'influence de la marée, définie quand le marnage devient plus faible que 10% de la colonne d'eau (*i.e.* $TR/h < 0.1$). À l'aval, nous définissons la limite au niveau du maximum du gradient horizontal de salinité de fond (dS_b/dx), correspondant à la zone où la circulation barocline est la plus intense (Figure 9).

Cette définition, caractérisant un estuaire « actif », permet d'inclure les zones de turbidités estuariennes maximales (où sont présents les bouchons vaseux), et d'adopter une approche objective et quantifiable pour comparer les différents systèmes. Cela est illustré sur la Figure 8, représentant l'évolution 1DH de différentes variables le long de l'estuaire (valeurs moyennées sur l'année étudiée, *cf.* Tableau 2). Le positionnement du maximum de dS_b/dx apparaît en turquoise, délimitant le début de l'estuaire, s'étendant vers l'amont tant que le marnage relatif $TR/h > 0,1$.

Grandeurs caractéristiques de la physique estuarienne

Différents nombres adimensionnels peuvent être utilisés pour caractériser la physique estuarienne [Geyer and MacCready, 2014]. Cependant, ces nombres sont calculés localement (pour une section transversale donnée) et leur valeur dépend du positionnement le long de l'estuaire, rendant difficile la comparaison d'un estuaire à l'autre. Il est donc proposé ici d'utiliser la limite aval (*i.e.* maximum de dS_b/dx) pour calculer ces nombres sur l'ensemble des estuaires étudiés.

Nous déterminons ainsi le nombre de Froude Fr_f , calculé comme le rapport entre la vitesse induite par le débit du fleuve et la vitesse de propagation maximale d'une onde interne [Geyer, 2010] :

$$Fr_f = U_R / (\beta g S_o h)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

avec $U_R = Q/A$, où Q est le débit liquide et A la section transversale, $\beta = 7,7 \times 10^{-4}$ est le coefficient de contraction haline, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ est la constante de gravité, $S_o = 35,5 \text{ psu}$ est la salinité de référence à l'embouchure, et h est la profondeur moyenne sur une marée. Ce nombre Fr_f représente l'énergie fluviale du système.

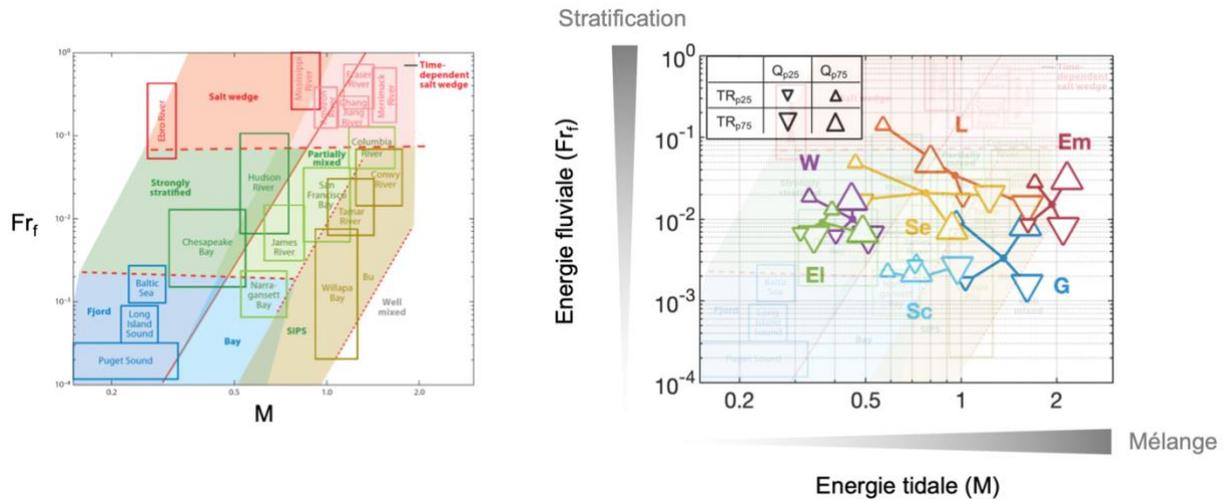


Figure 10. (Gauche) Classification de la circulation estuarienne dans l'espace paramétrique M - Fr_f [Geyer and MacCready, 2014], et (droite) représentation des estuaires CAPTURE dans le même espace paramétrique (Elbe 'El', Escaut 'Sc', Weser 'W', Seine 'Se', Loire 'L', Gironde 'G' et Ems 'Em'). Les points représentent les médianes annuelles ; les petits (resp. grands) triangles représentent les conditions de mortes eaux (resp. vives eaux) (i.e. percentiles 25 et 75 du marnage TR annuel), ainsi que les conditions d'étiage (∇) et de crue (Δ) (i.e. percentiles 25 et 75 du débit Q annuel).

Le nombre de mélange M est défini comme l'efficacité du mélange pour un estuaire stratifié [Geyer and MacCready, 2014] :

$$M = [(C_D U_T^2) / (\omega N_0 h^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

où U_T est la vitesse tidale, calculée comme la vitesse barotrope maximale au cours d'un cycle de marée, $C_D = 3 \times 10^{-3}$ est le coefficient de traînée au fond, $\omega = 1/(12,4 \times 3600) \text{ s}^{-1}$ est la fréquence tidale, et $N_0 = (\beta g S_0 / h)^{\frac{1}{2}}$ est la fréquence de flottabilité. Ce nombre M représente l'énergie tidale du système.

Enfin, le nombre de Simpson Si est calculé comme le ratio du changement d'énergie potentielle sur le taux de production d'énergie cinétique turbulent [Simpson et al., 1990] :

$$Si = (b_x h^2) / (C_D U_T^2) \quad (3)$$

avec la flottabilité $b_x = -g\beta dS/dx$. Ce nombre Si , aussi appelé nombre de Richardson horizontal [Stacey et al., 2001], représente le rapport de force entre la stratification et le mélange.

L'évolution longitudinale de ces grandeurs est représentée sur la Figure 8. Une synthèse des estuaires est également représentée sur la Figure 10 via l'espace paramétrique M - Fr_f . Cet espace a été proposé par Geyer and MacCready [2014] pour classifier différents types de circulation estuarienne. Il faut cependant noter que la quantification des nombres M et Fr_f n'est pas spécialement cohérente pour l'ensemble des estuaires représentés car les données utilisées dans leur étude ne représentaient pas toujours les mêmes sections des estuaires. Dans le cadre du projet CAPTURE (Figure 10, droite), les estuaires étudiés couvrent un domaine assez large, allant de conditions très stratifiées (ex. Weser) à bien mélangées (ex. Ems) pour des forçages fluviaux faibles (ex. Escaut) à soutenus (ex. Loire).

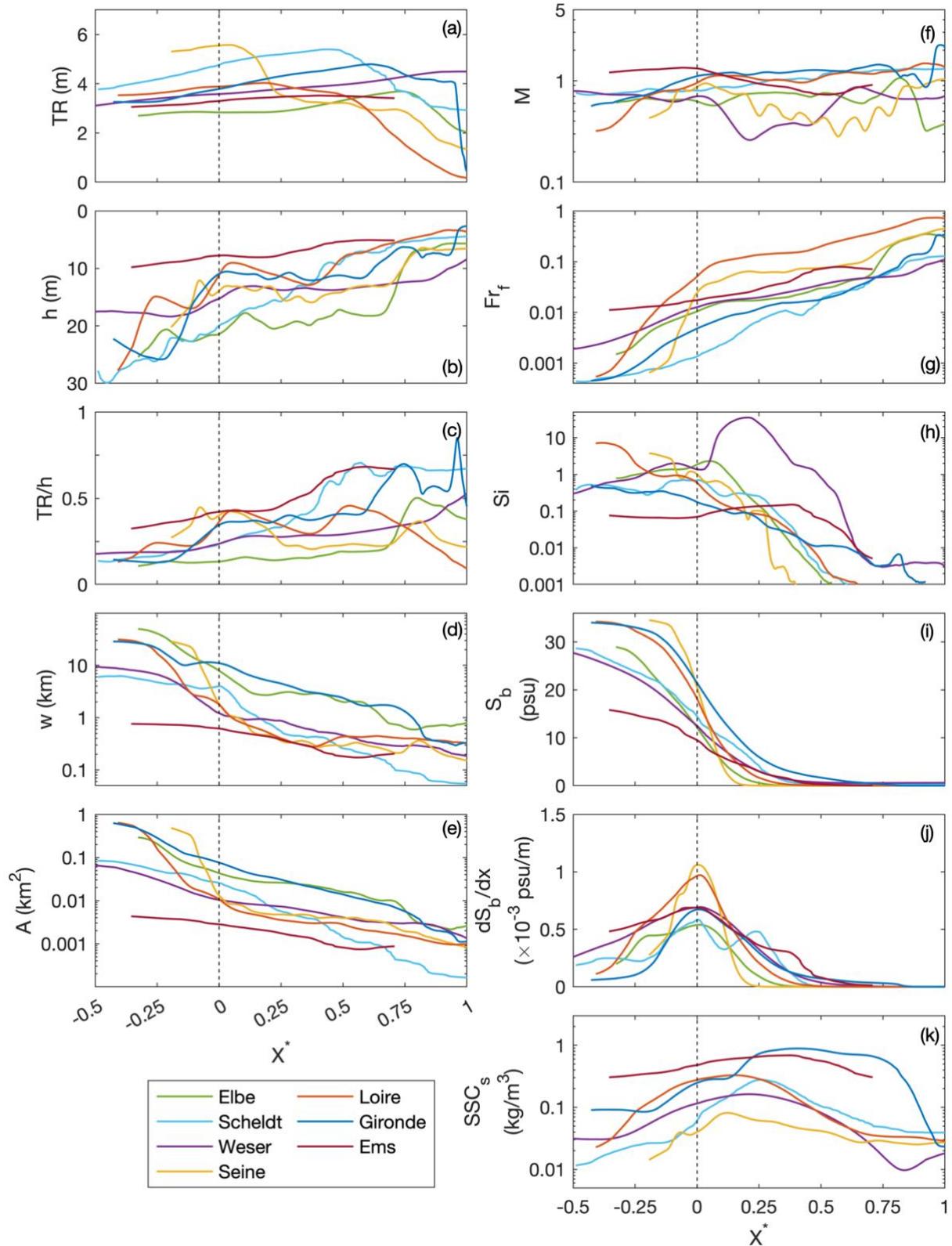


Figure 11. Évolution longitudinale (1DH) des valeurs annuelles médianes simulées pour les sept estuaires (couleur), en fonction de la distance normalisée X^* (limite aval à $X^* = 0$ et limite amont à $X^* = 1$) : (a) marnage TR, (b) profondeur d'eau h , (c) marnage relatif TR/h, (d) largeur w , (e) surface transversale A , (f) nombre de mélange M , (g) nombre de Froude Fr_f , (h) nombre de Simpson Si , (i) salinité de fond S_b , (j) gradient horizontal de salinité de fond dS_b/dx , et (k) concentration des matières en suspension de surface SSC_s .

5.2. DYNAMIQUE HYDRO-SEDIMENTAIRE DES ESTUAIRES CAPTURE

La dynamique hydro-sédimentaire propre à chaque estuaire est davantage détaillée dans les articles de référence (Tableau 2) [van Kessel et al., 2011a; van Maren et al., 2015b; Hesse et al., 2019; Diaz et al., 2020; Grasso et al., 2021; Grasso and Caillaud, 2023b; Reese et al., 2024]. Nous présentons ici les similarités et différences notoires en se basant sur une comparaison objective des différentes grandeurs, estimées de la même manière pour chaque estuaire.

Les résultats 1DH présentés en Figure 8 sont synthétisés sur la Figure 11 sur un repère longitudinal normalisé X^* , où $X^* = 0$ représente la limite aval correspondant au maximum du gradient horizontal de salinité de fond dS_b/dx , et $X^* = 1$ représente la limite amont quand $TR/h < 0,1$ (Section 5.1). Les estuaires étudiés dans ce projet se distinguent par des dynamiques tidales variées (Figure 11a). Cela se traduit par des tendances hypersynchrones [Le Floch, 1961; Dalrymple and Choi, 2007] pour la majorité des estuaires avec un maximum d'amplitude tidal pouvant être proche de l'embouchure (ex. $X^* \sim 0,2$ pour la Loire), en milieu d'estuaire ($X^* \sim 0,45-0,6$ pour la l'Escaut, l'Ems et Gironde), ou proche de la limite d'influence de la marée en amont (ex. $X^* \sim 0,75-0,95$ pour l'Elbe et la Weser). Cependant, on observe une tendance presque hyposynchrone pour la Seine avec un maximum d'amplitude tidal à $X^* \sim 0,05$.

L'évolution du marnage relatif TR/h (Figure 11c), ainsi que le mélange tidal M (Figure 11f), mettent en évidence des estuaires faiblement énergétiques à l'embouchure, *i.e.* à la limite aval (ex. Elbe et Weser) et d'autres pour lesquels l'énergie tidale est plus intense (ex. Ems, Gironde et Loire), comme illustré sur la Figure 10. A noter que ce sont les estuaires avec le plus fort mélange qui présentent les plus fortes concentrations en MES (Figure 11k).

On observe également que ce sont les estuaires avec les énergies fluviales les plus fortes, *i.e.* grand nombre de Froude (ex. Loire et Seine, Figure 11g), qui présentent les gradients horizontaux de salinité les plus élevés (Figure 11j). Cela corrobore la relation positive entre Fr_f et dS_b/dx [Valle-Levinson, 2010]. Ces forts gradients de salinité induisent des circulations baroclines plus intenses [MacCready and Geyer, 2010; Ralston and Geyer, 2019] (ex. de la Loire, Annexe 11), favorisant la remontée des sédiments fins et leur piégeage dans l'estuaire [Brenon and Le Hir, 1999; Burchard et al., 2018]. A noter l'atténuation du gradient de salinité dans l'Escaut (double pic) due à une seconde arrivée d'eau douce dans la zone de transition, limitant l'intensité de la circulation barocline (Annexe 11).

5.3. CONCEPTUALISATION GLOBALE DE LA TURBIDITE ESTUARIEENNE

Malgré la compréhension avancée des mécanismes responsables de la formation des bouchons vaseux [Burchard et al., 2018], il n'existe pas encore de formulation simple permettant d'estimer la concentration maximale des MES dans les estuaires tidaux. En se basant sur 44 estuaires européens et américains, Uncles et al. [2002] ont proposé une relation entre la concentration maximale en MES (SPM), la longueur tidale de l'estuaire (TL) et le marnage moyen en vives eaux ($MSTR$) estimé à l'embouchure (Figure 12), telle que :

$$SPM = 0.0055 (MSTR)^{2.8} (TL)^{1.7} \quad (4)$$

Cette relation empirique met en évidence l'influence des courants de marée sur la resuspension des sédiments, plus intenses pour des marnages forts et des estuaires longs. Cependant, lorsque l'on projette les mesures de turbidité issues des estuaires CAPTURE sur le même espace paramétrique, on note de fortes disparités avec la turbidité prédite par la formulation d'Uncles et al. [2002] (ex. Ems et Seine). On observe également de fortes différences de turbidité pour des estuaires situés au même endroit (ex. Loire et Escaut). Cela implique que la variabilité de la turbidité estuarienne n'est pas suffisamment bien captée par les deux grandeurs proposées (*i.e.* marnage et longueur tidale) et qu'il est nécessaire de réfléchir à une autre approche.

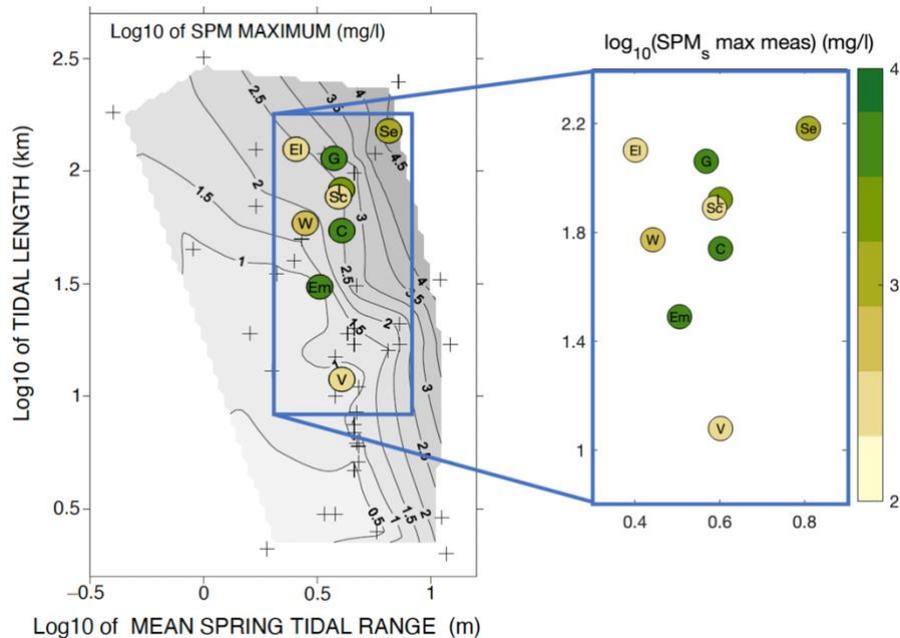


Figure 12. Turbidité estuarienne maximum en fonction de la longueur tidale et du marnage moyen en vives eaux, d'après Uncles et al. [2002], et (couleur) représentation des mesures in situ CAPTURE dans le même espace paramétrique (Elbe 'El', Escaut 'Sc', Weser 'W', Seine 'Se', Loire 'L', Gironde 'G' Ems 'Em', Charente 'C' et Vilaine 'V').

Simulations numériques

Dans un premier temps, nous nous appuyons sur les résultats issus des simulations numériques pour développer le concept d'estimation du maximum de turbidité estuarienne (ESTUMAX). Sachant que ce sont les niveaux élevés de turbidité qui ont le plus d'impacts sur les écosystèmes (ex. limitation de la production primaire, hypoxies, adsorption de contaminants [Uncles et al., 2002]), nous cherchons à caractériser la turbidité maximale. Nous utilisons le percentile 75 par cycle de marée (SSC_{p75}), permettant d'obtenir une estimation forte mais qui est peu sensible aux valeurs maximales potentiellement erronées (ex. pics non réalistes, saturation d'un capteur). Pour chaque cycle de marée, nous cherchons la valeur de turbidité (SSC_{p75}) la plus élevée le long de l'estuaire. Afin que la conceptualisation de la turbidité maximale soit la plus pertinente et généralisable, nous suivons une approche basée sur la physique estuarienne mettant en avant les énergies tidales (M) et fluviales (Fr_f) [Geyer and MacCready, 2014]. Comme illustré sur la Figure 10, ces nombres caractéristiques sont estimés à la limite estuarienne aval telle que défini dans ce projet (*i.e.* au niveau du maximum du gradient horizontal de salinité de fond).

Pour chaque estuaire, une simulation annuelle permet de générer environ 700 valeurs de turbidité maximale (moyenne sur la colonne d'eau par cycle de marée) associées à un nombre de mélange et de Froude dépendant des conditions tidales et hydrologiques du cycle de marée considéré (Figure 13a). A noter que les données de l'Elbe ne sont pas illustrées car la dynamique sédimentaire n'a pas été simulée. On observe une tendance bien marquée avec la turbidité qui augmente lorsque le mélange s'intensifie. L'interpolation de l'ensemble des cycles de marée dans le diagramme M - Fr_f (Figure 13b) fait apparaître que cette augmentation est privilégiée pour des nombres de Froude de l'ordre de 0.01. Ces résultats offrent une première vision explicative et quantitative de la turbidité maximale pouvant être atteinte dans les estuaires à marée. Il faut toutefois noter que c'est une vision globale intégrant de nombreuses variations non considérées explicitement (ex. variabilité transversale, hystérésis vives eaux-mortes eaux, hystérésis crue-étiage [McSweeney et al., 2016; Grasso et al., 2018; Ralston et al., 2020]).

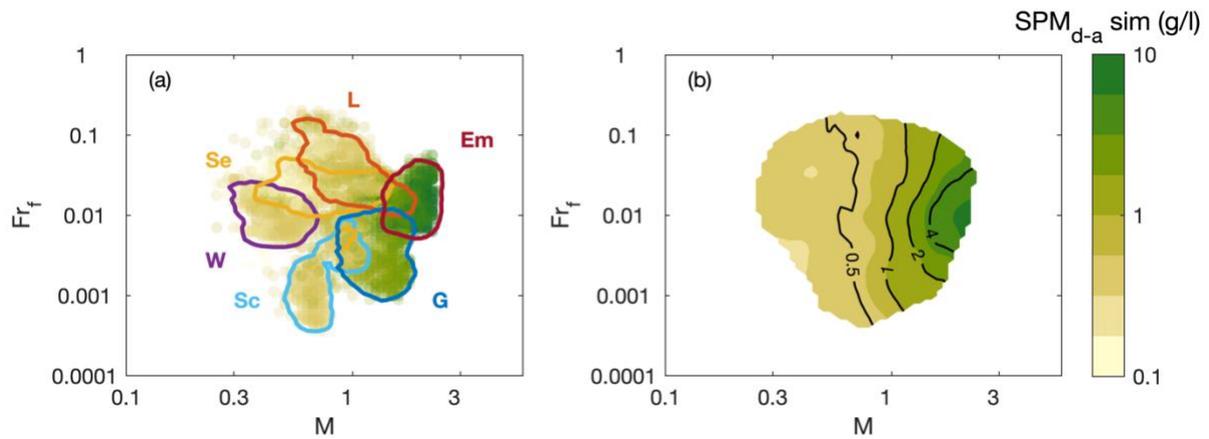


Figure 13. Turbidité maximale simulée SPM_{d-a} (moyennée sur la colonne d'eau) en fonction des nombres M et Fr_f (calculés à la limite aval) pour les six estuaires (Escaut 'Sc', Weser 'W', Seine 'Se', Loire 'L', Gironde 'G' et Ems 'Em') : (a) par cycle de marée, avec l'occurrence principale par estuaire représentée par les contours de couleur, et (b) interpolée sur l'espace M - Fr_f .

Simplification des nombres caractéristiques

Afin que la méthode d'estimation de la turbidité puisse être plus largement appliquée à de nombreux estuaires, il est nécessaire de simplifier le calcul des grandeurs caractéristiques en se basant sur des paramètres que les scientifiques et gestionnaires peuvent plus facilement obtenir. Par exemple, la surface transversale A dans le nombre de Froude (Eq. 1) et la vitesse U_T dans le nombre de mélange (Eq. 2) sont des informations relativement difficiles à connaître. Afin de conserver une représentation correcte des nombres tout en simplifiant leur calcul, nous avons abouti à 4 paramètres indispensables (Figure 14) :

- Le marnage à la limite aval TR_0 .
- Le débit sortant à la limite aval Q_0 .
- La profondeur d'eau représentative de l'estuaire h_m .
- La largeur représentative de l'estuaire w_m .

La profondeur (resp. largeur) représentative est calculée comme la médiane de la profondeur $h(x)$ (resp. largeur $w(x)$) le long du talweg entre les limites amont et aval (Figure 14).

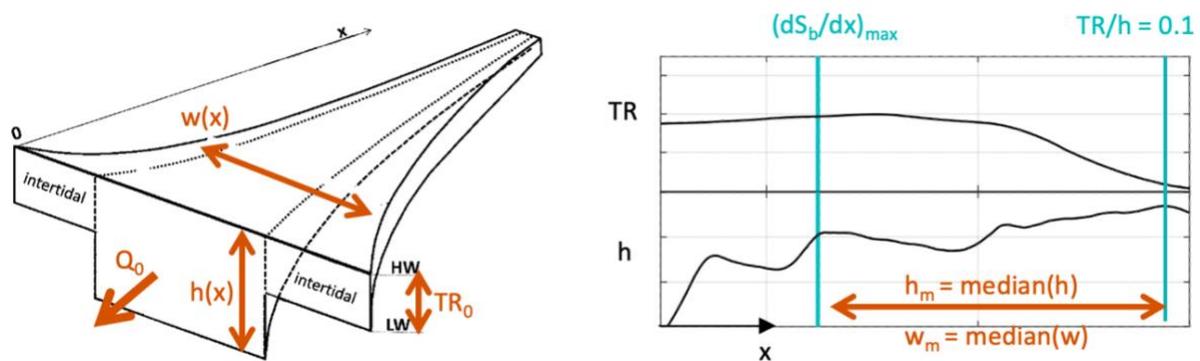


Figure 14. Schéma représentatif des grandeurs caractéristiques nécessaires au calcul des nombres de mélange et de Froude simplifiés.

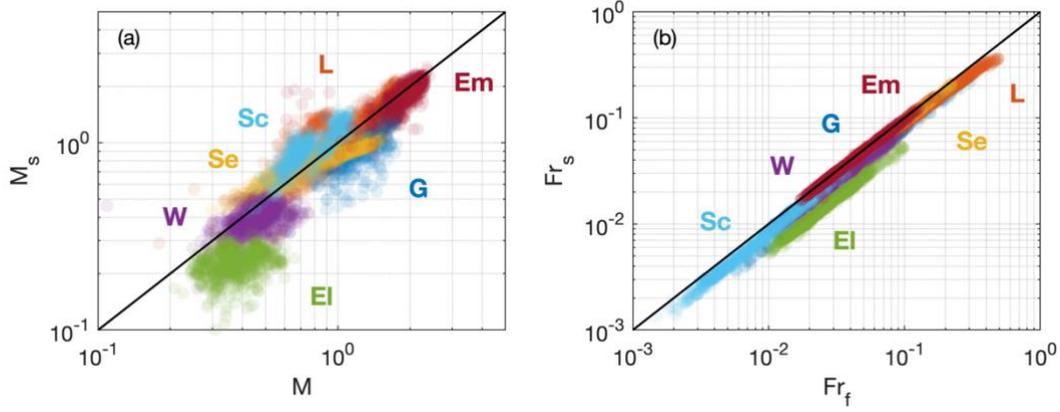


Figure 15. Corrélation entre les estimations exactes et simplifiées des grandeurs caractéristiques par cycle de marée pour les 7 estuaires (Elbe 'El', Escaut 'Sc', Weser 'W', Seine 'Se', Loire 'L', Gironde 'G' et Ems 'Em'). (a) Nombres de mélange M calculé à la limite aval et M_s calculé suivant l'Éq. 5, et (b) nombres de Froude Fr_f et Fr_s calculés comme la médiane sur l'estuaire entre les limites aval et amont (Éq. 6).

Concernant le nombre de mélange, la vitesse tidale U_T est difficile à approximer avec des paramètres globaux car elle dépend de nombreuses variables locales (ex. marnage, largeur intertidale, rugosité) [Valle-Levinson, 2022]. Cependant, on observe que cette vitesse est corrélée au marnage relatif, en particulier lorsqu'on considère le marnage à l'embouchure et la profondeur d'eau médiane dans l'estuaire, tel que $U_{TS} \approx \alpha(TR_0/h_m)$. On obtient une approximation satisfaisante de M en définissant le nombre de mélange simplifié tel que :

$$M_s = [(C_D U_{TS}^2)/(\omega N_{0m} h_m^2)]^{\frac{1}{2}} \quad \text{avec} \quad N_{0m} = (\beta g S_0 / h_m)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

A noter le facteur $\alpha = 2$ permettant d'améliorer l'approximation de M (Figure 15a). On observe toutefois une sous-estimation de M plus marquée pour l'Elbe, sûrement due aux zones intertidales plus développées à l'embouchure (variabilité de la largeur w sur la Figure 8) modifiant la propagation de la marée.

En faisant l'hypothèse d'une section rectangulaire, la surface transversale peut être approximée par $A_s \approx h \cdot w_{lw}$, avec w_{lw} la largeur de l'estuaire à basse mer. Utiliser la largeur à basse mer permet de mieux représenter la section d'écoulement du chenal principal et apporter une meilleure approximation de la section. Par cohérence avec le calcul du nombre de mélange simplifié considérant la profondeur médiane de l'estuaire, le nombre de Froude simplifié peut s'écrire :

$$Fr_s = U_{RS}/(\beta g S_0 h_m)^{\frac{1}{2}} \quad \text{avec} \quad U_{RS} = Q/(h_m \cdot w_m) \quad (6)$$

où w_m est la médiane de la largeur w_{lw} entre les limites aval et amont. La Figure 15b illustre la bonne validité de l'approximation, avec cependant des écarts plus importants pour les estuaires de l'Elbe et la Weser pour lesquels les sections sont moins chenalisées à l'aval.

L'utilisation de ces approximations nous permet de représenter la distribution de la turbidité maximale dans le diagramme simplifié M_s - Fr_s (Figure 16). Cette distribution est très semblable à celle présentée sur la Figure 13, avec cependant des valeurs de Fr_s plus fortes dû au calcul intégré sur l'ensemble de l'estuaire et non à la limite aval. Cette représentation cohérente de la turbidité maximale dans un espace paramétrique caractérisant la physique estuarienne (ESTUMAX) est une forte avancée dans la conceptualisation globale de la turbidité inter-estuaires. Cette preuve de concept obtenue avec des données de simulations numériques est ensuite testée pour validation avec des mesures *in situ*.

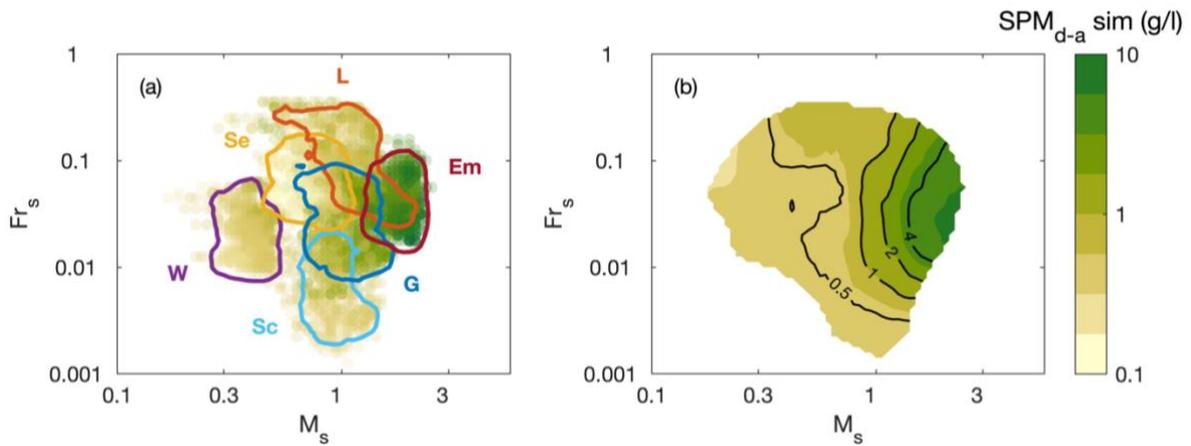


Figure 16. Turbidité maximale simulée SPM_{d-a} (moyennée sur la colonne d'eau) en fonction des nombres simplifiés M_s et Fr_s (Éq. 5 et 6) pour les six estuaires (Escaut 'Sc', Weser 'W', Seine 'Se', Loire 'L', Gironde 'G' et Ems 'Em') : (a) par cycle de marée, avec l'occurrence principale par estuaire représentée par les contours de couleur, et (b) interpolée sur l'espace M_s - Fr_s .

Mesures *in situ*

Afin de tester et valider la méthode basée sur les données des simulations, nous utilisons les mesures de turbidité issues des réseaux de mesures déployés dans les estuaires (symboles sur la Figure 8, Annexe 13). Cependant, le nombre de stations de mesures est variable d'un estuaire à l'autre, ainsi que la position des mesures dans la colonne d'eau. N'ayant pas de mesures de fond dans tous les estuaires, nous utilisons dans cette étude les mesures de surface (ou sub-surface dans l'Escaut et la Weser). La faible distribution longitudinale des stations dans certains estuaires ne permet pas de suivre la dynamique du bouchon vaseux au cours d'un cycle hydrologique (*i.e.* migration amont-aval avec les fluctuations du débit [Grasso *et al.*, 2018]). Nous nous basons donc sur les conditions de débit faible ($Q < Q_{med}$) pour lesquelles la turbidité estuarienne est en général plus élevée (concentration du bouchon vaseux dans des sections plus étroites en amont). Dans ces conditions, nous recherchons la station de mesures pour laquelle la turbidité est la plus forte, puis nous effectuons le même type d'analyse par cycle de marée que pour les simulations numériques (SSC_{p75}). Cette approche implique que nous n'analysons pas les conditions de fort débit. Cependant, ça nous permet d'avoir un aperçu des conditions les plus turbides pouvant être observées dans les estuaires.

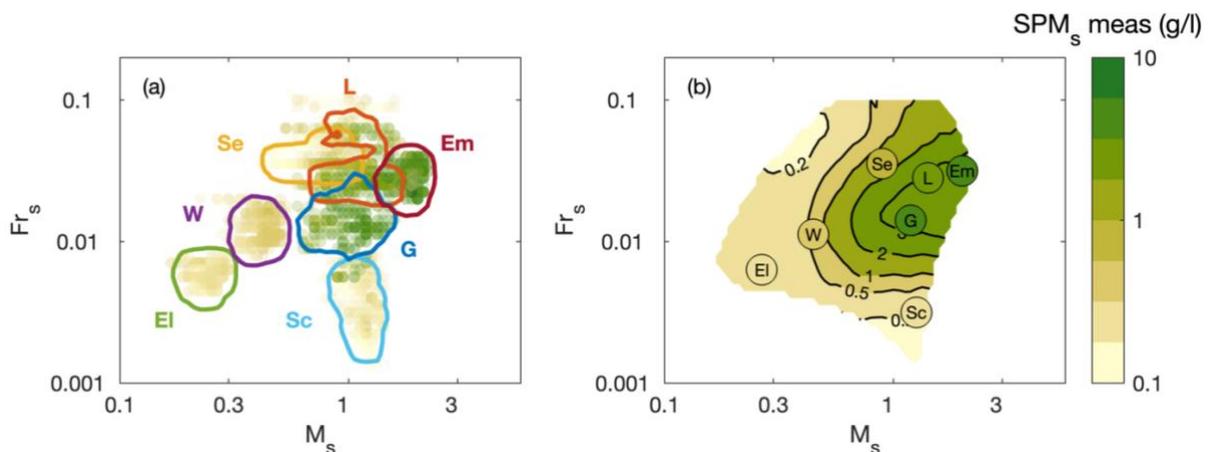


Figure 17. Turbidité maximale mesurée en surface SPM_s par faible débit ($Q < Q_{med}$) en fonction des nombres simplifiés M_s et Fr_s (Éq. 5 et 6) pour les sept estuaires (Elbe, 'El', Escaut 'Sc', Weser 'W', Seine 'Se', Loire 'L', Gironde 'G' et Ems 'Em') : (a) par cycle de marée, avec l'occurrence principale par estuaire représentée par les contours de couleur, et (b) interpolée sur l'espace M_s - Fr_s . Sur (b), les ronds représentent les conditions de fort marnage ($TR > TR_{med}$) pour chaque estuaire.

La distribution de la turbidité mesurée dans le diagramme M_s-Fr_s (Figure 17) est très cohérente avec la distribution simulée (Figure 16). Les concentrations en MES sont plus faibles car représentatives des conditions de surface, mais on retrouve la tendance à l'augmentation avec le nombre mélange et une intensification pour des nombres de Froude intermédiaires. Pour chaque estuaire, les ronds représentent les conditions de faible débit ($Q > Q_{med}$) et de fort marnage ($TR > TR_{med}$) pour lesquelles sont attendues les turbidités les plus élevées. Ces résultats issus d'observations *in situ* viennent valider la méthode ESTUMAX issue de l'analyse des simulations numériques.

5.4. APPLICATION A D'AUTRES ESTUAIRES

L'objectif est ici de tester pour d'autres estuaires l'approche développée sur les sept estuaires CAPTURE. On prend les cas des estuaires de la Vilaine et de la Charente qui se distinguent entre autres par différentes dimensions (12 km pour la Vilaine et 55 km pour la Charente), et des niveaux de turbidité maximale très contrastés allant de la centaine de mg/l en Vilaine jusqu'à plusieurs g/l en Charente (Figure 18 et Tableau 3). Pour cela, nous nous appuyons sur les données fournies par l'EPTB Vilaine et *Toublanc et al.* [2016].

La méthode ESTUMAX pour estimer la turbidité maximale potentielle des estuaires de la Vilaine et la Charente est détaillée en Annexe 12. Nous rappelons brièvement ici les étapes à suivre.

- Nous utilisons les données de largeur w et profondeur dans le chenal h (EPTB Vilaine + *Toublanc et al.* [2016]) le long de l'estuaire (Figure 14), et nous définissons un marnage à l'embouchure TR_0 ainsi qu'un débit donné Q (Tableau 3).
- Afin de déterminer la longueur de l'estuaire sur laquelle intégrer les valeurs de w et h , nous définissons la limite amont au niveau du barrage d'Arzal pour la Vilaine et du barrage de Saint Savinien pour la Charente (rectangles rouges sur la Figure 18). Dans le cas où nous ne connaissons pas la position du maximum de gradient de salinité, nous définissons la limite aval pour un nombre de Froude $Fr = 0,002$. Cette valeur permet de caractériser un système estuarien qui commence à être stratifié sous l'influence des apports d'eau douce [*Geyer and MacCready, 2014*].
- La définition des forçages (TR_0, Q) et des dimensions intégrées sur la longueur de l'estuaire (*i.e.* valeurs médianes h_m et w_m) nous permet de calculer les nombres M_s (Eq. 5) et Fr_s (Eq. 6), puis de les reporter sur le diagramme M_s-Fr_s , basé sur les données des estuaires CAPTURE (Figure 19).



Figure 18. Estuaires de la Vilaine et de la Charente : limites amont (rectangles rouge) au barrage d'Arzal pour la Vilaine et au barrage de Saint Savinien pour la Charente (source : Géoportail).

Le positionnement de l'estuaire de la Charente sur le diagramme M_s - Fr_s est cohérent avec les niveaux de turbidités observés. Pour des conditions d'étiage et de marnage moyen, la Charente se situe dans les conditions les plus favorables aux fortes turbidités, en accord avec les fortes valeurs pouvant être mesurées dans l'estuaire [Toublanc et al., 2016].

Tableau 3. Caractéristiques des estuaires de la Vilaine et de la Charente, à partir des données issues de Toublanc et al. [2016] et de l'EPTB Vilaine.

	Charente (2011)	Vilaine (2009)
Longueur estuaire (km) Long. rel.: L_e/L_t	55 0.9	12 0.2
Marnage TR_0 (m)	4	4
Débit étiage Q (m ³ /s)	10	30
MES [surf, p_{75}] (g/l)	4	0.2

L'estuaire de la Vilaine se situe en dehors de l'espace d'interpolation issu des données CAPTURE, dans une zone de fort mélange et de faible énergie fluviale. Ce positionnement semble cohérent avec les faibles niveaux de turbidités observés pour des nombres de Froude $Fr_s < 0,005$. De plus, il est attendu que les estuaires ayant une très forte énergie tidale ($M_s > 2-3$) ne soient pas favorable à de forts niveaux de turbidités à cause du mélange trop important induisant une dispersion des sédiments [Burchard et al., 2018]. Il semblerait que les conditions les plus propices à la formation de bouchons vaseux de fortes intensités (et donc les zones potentielles de turbidité maximale) se situent pour des énergies fluviale et tidale soutenues mais non extrêmes :

- Si Fr_s est trop faible, la circulation barocline est trop faible et ne permet pas l'accumulation des sédiments dans l'estuaire. En revanche si Fr_s est trop fort, les courants induits par le fleuve sont trop forts et induisent un export de sédiment trop important.
- Si M_s est trop faible, il n'y a pas assez d'énergie pour mettre en suspension les sédiments. En contrepartie si M_s est trop fort, les sédiments se retrouvent dispersés par les courants tidaux et/ou fluviaux.

Cette tendance est en accord avec les résultats de Defontaine et al. [submitted] pour le cas d'une étude semi-analytique à l'aide du modèle *iFlow* [Dijkstra et al., 2017] sur une configuration estuarienne schématisée. Ce travail a exploré les régimes hydro-sédimentaires responsables du piégeage des sédiments estuariens et a mis en évidence les faibles niveaux de turbidité pour des conditions de mélange intense (pas de formation de bouchon vaseux).

En résumé, la conceptualisation du maximum de turbidité dans l'espace paramétrique M_s - Fr_s , issue des données des estuaires CAPTURE, s'avère cohérente avec le cas d'autres estuaires de dimensions et turbidités variables. Les données actuelles ne permettent pas de couvrir l'ensemble de l'espace, mais elles nous informent déjà sur les conditions les plus favorables à la génération de bouchons vaseux de forte intensité.

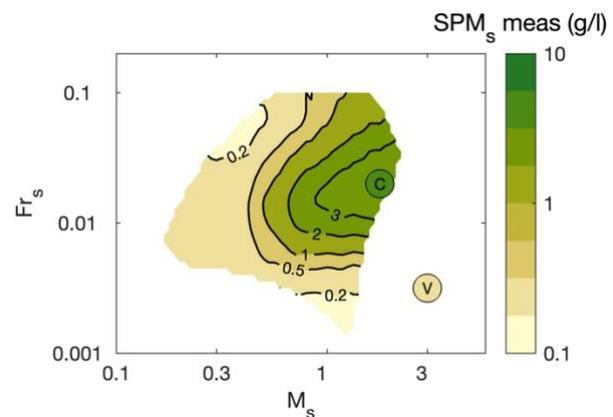


Figure 19. Représentation des estuaires de la Vilaine 'V' et de la Charente 'C' sur le diagramme ESTUMAX.

6. ÉVOLUTION DE LA TURBIDITE DANS LE CADRE DU CHANGEMENT GLOBAL

A l'échelle du changement global, les pressions anthropiques et climatiques génèrent des perturbations significatives sur les environnements estuariens. Dans le cadre de CAPTURE, nous étudions les réponses potentielles du maximum de turbidité face à deux changements caractéristiques :

- La modification de la profondeur des chenaux de navigation [Grasso and Le Hir, 2019];
- La modification des apports liquides amont [Flipo et al., 2019].

L'analyse de ces changements potentiels se base sur la modification des paramètres forçant de la méthode ESTUMAX (paramètres de forme et de débit). Il n'est cependant pas possible d'étudier l'effet de la montée du niveau de la mer, car des phénomènes d'adaptation morphologique progressive agissent, nécessitant une modélisation morphodynamique dépassant le cadre de ce projet.

Sur la base des discussions ayant eu lieu dans le groupe de travail « Interdisciplinaire » (Tableau 1), des recommandations ont été formulées afin que l'estimation des métriques sédimentaires soient pertinents pour les études des différents compartiments de l'écosystème. Parmi ces critères, il ressort le besoin de caractériser le maximum de turbidité (fort impact sur la lumière, l'oxygène, la filtration et les processus d'adsorption), en particulier pour les périodes estivales qui sont les plus productives. Ces pour ces raisons que nous nous intéressons ici spécifiquement aux conditions d'étiages (faible débit) pour des marnages élevés.

6.1. EFFETS DE PRESSIONS ANTHROPIQUES SUR LA TURBIDITE

Pour illustrer l'influence des pressions anthropiques sur l'évolution de la turbidité estuarienne, nous utilisons le cas de l'approfondissement du chenal de navigation en estuaire de Loire au cours du dernier siècle (Figure 20). Dans la partie aval de l'estuaire (entre Saint Nazaire et Nantes), la profondeur du chenal a augmenté d'environ 6 m entre 1900 et 2000, associé à une augmentation de la turbidité d'un rapport 10 [de Goede, 2020]. Ce type de transition d'un état « normal » vers un état « hyper-turbide » a également été observé dans d'autres estuaires suite à l'approfondissement des chenaux, comme par exemple dans l'Ems [Winterwerp et al., 2013; van Maren et al., 2015a; Dijkstra et al., 2019].

Le scénario que nous réalisons ici consiste à appliquer la méthode ESTUMAX, *i.e.* le diagramme $SPM_s = f(M_s - Fr_s)$, pour deux types de profondeurs de chenal (conditions Loire 1900 'L₁₉' et Loire 2000 'L₂₀', Figure 20a) en conservant la même largeur et les mêmes forçages ($TR_0 = 4,3$ m et $Q = 160$ m³/s). Cela nous permet de calculer deux couples de paramètres $M_s - Fr_s$ dont nous connaissons les niveaux de turbidité associés (Figure 20b).

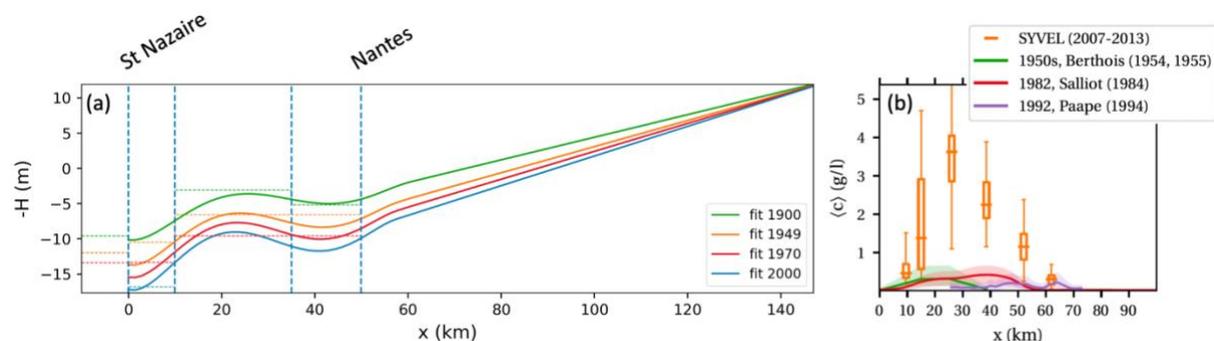


Figure 20. Évolution en estuaire de Loire au cours du dernier siècle de (a) la profondeur H du chenal principal et (b) la concentration en MES $\langle c \rangle$ (d'après de Goede [2020]).

De manière attendue, l'estuaire de Loire se situe en 2000 dans la zone de forte turbidité du diagramme (Figure 21). Cependant pour les conditions bathymétriques de 1900, on observe un positionnement caractérisé par des énergies fluviale et tidale plus importantes. Cela s'explique par la plus faible profondeur de l'estuaire en 1900, augmentant le mélange ($M_s \approx h^{-7/4}$, Eq. 5) et le Froude ($Fr_s \approx h^{-3/2}$, Eq. 6). Néanmoins, la relation n'est pas directe car la réduction de la profondeur vient aussi repousser la limite aval définie à $Fr_s = 0,002$ et donc modifier le hauteur médiane h_m (Annexe 12).

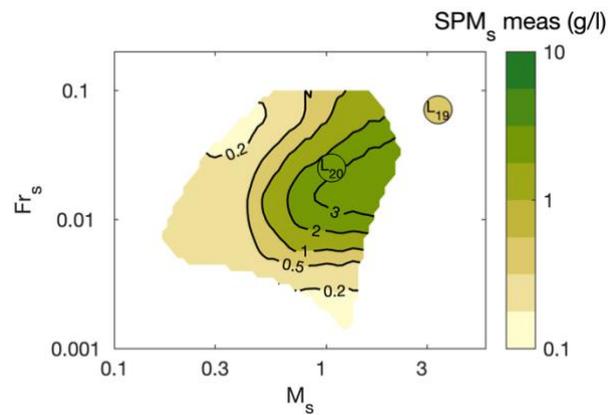


Figure 21. Représentation de l'estuaire de la Loire avec les bathymétries de 1900 'L₁₉' et de 2000 'L₂₀' sur le diagramme ESTUMAX.

De la même manière que pour le cas de la Vilaine (Figure 19), les plus faibles niveaux de turbidité observés pour la configuration de la Loire en 1900 semblent confirmer l'influence du mélange sur la limitation de l'accumulation des sédiments dans l'estuaire. Ce scénario nous montre que la méthode ESTUMAX peut être utilisée pour analyser les trajectoires potentielles de la turbidité estuarienne face à des changements morphologiques d'origine anthropique (ex. modification de la profondeur des chenaux et/ou de la largeur de l'estuaire).

6.2. EFFETS DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA TURBIDITE

De manière similaire à la partie précédente, nous étudions ici le scénario d'une modification du débit du fleuve sur la turbidité maximale en prenant le cas de l'estuaire de la Loire. La valeur du débit d'étiage considérée pour la configuration 2000 'L₂₀' ($Q_{20} = 160 \text{ m}^3/\text{s}$) correspond au percentile 25 calculé sur l'année 2018 (année utilisée dans le projet). Dans le cadre du changement climatique à l'horizon 2100, les débits des fleuves sont amenés à évoluer avec une intensification des débits de crues et une baisse des débits d'étiages [Flipo et al., 2019]. Nous considérons pour 2100 'L₂₁' une diminution de 50% du percentile 25 (soit $Q_{21} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$), sachant que cette valeur correspond déjà à un débit pouvant être observé à l'heure actuelle. Le reste des paramètres de forme (h et w) et de marnage ($TR_0 = 4,3 \text{ m}$) sont identiques. Toutefois, la modification du débit considéré vient modifier le positionnement de la limite aval (à $Fr_s = 0,002$) et donc le calcul des dimensions h_m et w_m représentatives de l'estuaire. Cela explique qu'une variation de débit ne vienne pas seulement modifier le nombre de Froude Fr_s , mais également le nombre de mélange M_s qui ne dépend pas directement de Q (Eq. 5).

Le positionnement des configurations 'L₂₀' et 'L₂₁' sur le diagramme M_s - Fr_s (Figure 22) illustre le décalage de l'estuaire vers une zone de plus forte turbidité (augmentation de l'énergie tidale et réduction de l'énergie fluviale). Cela implique que la réduction des débits d'étiages à venir risque d'intensifier le maximum de turbidité actuellement observé en Loire. Cette augmentation potentielle de plus de 50% pourrait venir aggraver les problèmes d'hypoxie à proximité du bouchon vaseux. Le diagramme ESTUMAX nous permet donc d'étudier les trajectoires potentielles de la turbidité estuarienne face à l'évolution de certains paramètres environnementaux (ex. débit et marnage).

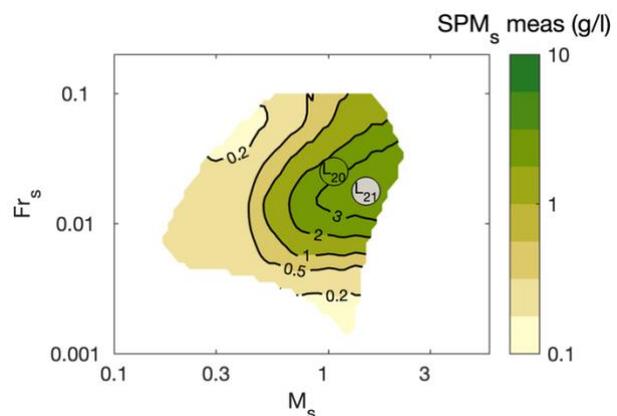


Figure 22. Représentation de l'estuaire de la Loire avec les débits d'étiage de 2000 'L₂₀' et de 2100 'L₂₁' sur le diagramme ESTUMAX.

7. CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

En se basant sur des mesures *in situ* et des simulations numériques réalistes issues de sept estuaires tidaux européens (Gironde, Loire, Seine, Escaut, Ems, Weser et Elbe), le projet CAPTURE a permis de développer une méthode pour estimer le maximum potentiel de turbidité estuarienne (ESTUMAX). Cette méthode s'appuie sur un nombre limité de paramètres relativement faciles à obtenir : le marnage à l'embouchure, le débit du fleuve, la profondeur le long du chenal principal et la largeur de l'estuaire. Cette méthode a pu être appliquée à d'autres estuaires de dimensions et de turbidité variable (Charente et Vilaine).

Il a été montré que la méthode ESTUMAX permet d'étudier les trajectoires d'évolution du maximum de turbidité face à différentes pressions anthropiques et climatiques (ex. modifications de la forme de l'estuaire, du débit et du marnage). Par exemple, un approfondissement du chenal principal ou la réduction des débits en étiage peuvent mener à l'intensification du maximum de turbidité.

Cette caractérisation de la turbidité estuarienne peut également être utilisée pour dégager des typologies d'estuaires. En fonction de la forme de l'estuaire (profondeur, largeur) et de ses forçages principaux (marnage, débit), il est possible de déterminer sa turbidité potentielle (ex. turbide, hyper-turbide). Cela a directement un impact sur la capacité de production primaire du système (en fonction de l'atténuation de la lumière dans la colonne d'eau) et des risques potentiels d'hypoxies (dus à la teneur en matières en suspension).

La méthode ESTUMAX est construite à partir de systèmes estuariens meso- et macro-tidaux européens (marnages de 2 à 8 m) présentant des bouchons vaseux relativement bien développés. Il faudrait par la suite étendre cette analyse à d'autres systèmes (ayant d'autres forçages) afin d'améliorer la couverture de l'espace paramétrique. Cela pourrait par exemple d'intégrer des estuaires caractérisés par une forte turbidité à la limite aval, comme le cas des estuaires guyanais soumis à l'influence du panache turbide de l'Amazonie (ex. Mahury, Maroni ; [Orseau et al., 2017; Abascal-Zorrilla et al., 2020]). De plus, il serait intéressant d'intégrer les estuaires du nord-est des Etats-Unis d'Amérique qui sont caractérisés par des apports sédimentaires amont plus faibles que la majorité des estuaires européens (ex. Hudson, Delaware ; [Geyer et al., 2001; Sommerfield and Wong, 2011; Ralston et al., 2013]).

La prise en compte d'estuaires plus variés permettra d'avancer sur la question des systèmes du type « *supply-limited* », où la turbidité est limitée par la source sédimentaire disponible dans l'estuaire, et du type « *erosion-limited* », où la turbidité est limitée par la capacité de resuspension de l'estuaire (*i.e.* énergie tidale). Sur ce point, il est possible que la méthode ESTUMAX permette seulement d'estimer le maximum **potentiel** de turbidité, *i.e.* qui peut être atteint si suffisamment de sédiments sont présents dans le système (apports solides significatifs d'origines fluviale et/ou marine).

Les scientifiques et gestionnaires des écosystèmes estuariens sont également dans l'attente d'autres métriques sédimentaires pour répondre à leurs questionnements. Par exemple, la connaissance de la nature du lit sédimentaire (ex. teneur en vase, stock et évolution) est importante pour étudier la distribution des espèces benthiques et les capacités d'adaptation morphologique des estuaires. Cependant, ces quantités évoluent à des échelles de temps différentes de celles de la colonne d'eau et il existe peu d'observations *in situ* permettant de conceptualiser son évolution de manière similaire à la méthode d'estimation de la turbidité proposée dans ce projet. Il serait également pertinent de développer une méthode d'estimation des flux sédimentaires résiduels inter-estuaires, comme proposé par Grasso et al. [2021] pour l'estuaire de Seine, mais cela nécessite de s'appuyer davantage sur les simulations numériques car les mesures *in situ* ne permettent pas facilement d'estimer des flux nets aux embouchures [Schulz et al., 2018; Diaz et al., 2020; Verney et al., 2024]. Enfin, il y a de fortes attentes sur la connaissance de l'évolution de l'intrusion saline dans les estuaires face aux pressions anthropiques et climatiques à venir. Une approche similaire à celle utilisée dans ce projet pourrait être pertinente pour répondre à ce questionnement.

8. PRODUCTION SCIENTIFIQUE ISSUE DU PROJET CAPTURE

8.1. ARTICLES SCIENTIFIQUES

Grasso F., and Caillaud M. (2023). A ten-year numerical hindcast of hydrodynamics and sediment dynamics in the Loire Estuary. *Scientific Data*, 10(1), 394 (15p.). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02294-w>

Defontaine S., Dijkstra Y. M., and Grasso F. (submitted). A first exploration of sediment trapping regimes in estuaries. *Journal of Geophysical Research – Earth Surface*.

Grasso F., Bismuth E., Burchard H., Defontaine S., Dijkstra Y. M., Geyer W. R., Kösters F., Lafite R., Reese L., Schuttelaars H., Sottolichio A., Van Kessel T., Vanlede J., Van Maren B., Verney R., Walther R., and Zorndt A. (in preparation). An explanatory parameter space for estimating turbidity maximum in tidal estuaries.

8.2. CONFERENCES SCIENTIFIQUES

Grasso F., Diaz M., Sottolichio A., and Bismuth E. (2022). Investigating sediment transfers between macrotidal estuaries and coastal seas: Numerical modelling of the Gironde Estuary (France). *Ems-Scheldt symposium*. 16-17 June 2022, Wageningen, The Netherlands.

Grasso F., and Bismuth E. (2022). Intercomparison of suspended sediment dynamics in tidal estuaries: Sketching a global functioning based on limited forcing parameters. *PECS 2022 - Physics of Estuaries and Coastal Seas conference*. October 24-28, 2022, Perth, Australia.

Grasso F., Bismuth E., Burchard H., Defontaine S., Dijkstra Y. M., Geyer W. R., Kösters F., Lafite R., Reese L., Schuttelaars H., Sottolichio A., Van Kessel T., Vanlede J., Van Maren B., Verney R., Walther R., and Zorndt A. (2023). Can we simply predict maximum turbidity in tidal estuaries? *AGU23. Wide. Open. Science. AGU Fall Meeting 2023*. 11-15 December 2023, San Francisco, CA & Online Everywhere.

Grasso F., Bismuth E., Burchard H., Defontaine S., Dijkstra Y. M., Geyer W. R., Kösters F., Lafite R., Reese L., Schuttelaars H., Sottolichio A., Van Kessel T., Vanlede J., Van Maren B., Verney R., Walther R., and Zorndt A. (2024). A simple method for estimating potential turbidity maximum in NW European tidal estuaries. *PECS 2024 - Physics of Estuaries and Coastal Seas conference*. September 23-27, 2024, Bordeaux, France.

Defontaine S., Dijkstra Y. M., and Grasso F. (2024). Sediment trapping in estuaries. *PECS 2024 - Physics of Estuaries and Coastal Seas conference*. September 23-27, 2024, Bordeaux, France.

8.3. JEUX DE DONNEES

Grasso F., Caillaud M. (2023). CurviLoire Hindcast. IFREMER. <https://doi.org/10.12770/a56f1a01-bdf2-4f52-9cc7-4e4b8605520c>

Diaz M., Grasso F., Caillaud M. (2023). CurviGironde Hindcast IFREMER. <https://doi.org/10.12770/44ac4d72-c606-42ba-bf22-89e6520e0894>

9. REFERENCES

- Abascal-Zorrilla N., Vantrepotte V., Huybrechts N., Ngoc D. D., Anthony E. J., and Gardel A. (2020), Dynamics of the estuarine turbidity maximum zone from landsat-8 data: The case of the maroni river Estuary, French Guiana, *Remote Sensing*, 12(13), 2173.
- Allen G. P., Salomon J., Bassoullet P., Du Penhoat Y., and De Grandpre C. (1980), Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries, *Sedimentary Geology*, 26(1-3), 69-90.
- Avoine J., Allen G., Nichols M., Salomon J., and Larsonneur C. (1981), Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France: effect of man-made modifications on estuary—shelf sedimentology, *Marine Geology*, 40(1-2), 119-137.
- Billen G., Garnier J., Nemery J., Sebilo M., Sferratore A., Barles S., Benoit P., and Benoit M. (2007), A long-term view of nutrient transfers through the Seine river continuum, *Sci Total Environ*, 375(1-3), 80-97, doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.005.
- Booij N., Holthuisen L., and Ris R. (1996), The "SWAN" wave model for shallow water, in *Coastal engineering 1996*, edited, pp. 668-676.
- Brenon I., and Le Hir P. (1999), Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): identification of formation processes, *Estuarine, coastal and shelf science*, 49(4), 525-544.
- Burchard H., and Bolding K. (2002), *GETM: A general estuarine transport model; Scientific documentation*, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.
- Burchard H., Schuttelaars H. M., and Ralston D. K. (2018), Sediment Trapping in Estuaries, *Annual review of marine science*, 10, 371-395.
- Castaing P., and Allen G. P. (1981), Mechanisms controlling seaward escape of suspended sediment from the Gironde: a macrotidal estuary in France, *Marine Geology*, 40(1-2), 101-118.
- Cox J. R., Huismans Y., Knaake S., Leuven J., Vellinga N., van der Vegt M., Hoitink A., and Kleinhans M. (2021), Anthropogenic effects on the contemporary sediment budget of the lower Rhine-Meuse Delta channel network, *Earth's Future*, e2020EF001869.
- Coyne A., Gorse L., Curti C., Schafer J., Grosbois C., Morelli G., Ducassou E., Blanc G., Maillet G. M., and Mojtahid M. (2016), Spatial distribution of trace elements in the surface sediments of a major European estuary (Loire Estuary, France): Source identification and evaluation of anthropogenic contribution, *Journal of Sea Research*, 118, 77-91.
- Dalrymple R. W., and Choi K. (2007), Morphologic and facies trends through the fluvial–marine transition in tide-dominated depositional systems: a schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation, *Earth-Science Reviews*, 81(3-4), 135-174.
- Dalrymple R. W., Zaitlin B. A., and Boyd R. (1992), Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications: perspective, *Journal of Sedimentary Research*, 62(6).
- de Goede R. (2020), Regime shift in sediment concentrations in the Loire estuary.
- Defontaine S., Dijkstra Y. M., and Grasso F. (submitted), A first exploration of sediment trapping regimes in estuaries, *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*.
- Diaz M., Grasso F., and Caillaud M. (2023), CurviGironde Hindcast. IFREMER. <https://doi.org/10.12770/44ac4d72-c606-42ba-bf22-89e6520e0894>.
- Diaz M., Grasso F., Le Hir P., Sottolichio A., Caillaud M., and Thouvenin B. (2020), Modeling Mud and Sand Transfers Between a Macrotidal Estuary and the Continental Shelf: Influence of the Sediment Transport Parameterization, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(4), e2019JC015643.
- Dijkstra Y. M., Brouwer R. L., Schuttelaars H. M., and Schramkowski G. P. (2017), The iFlow modelling framework v2. 4: a modular idealized process-based model for flow and transport in estuaries, *Geoscientific Model Development*, 10(7), 2691.
- Dijkstra Y. M., Schuttelaars H. M., Schramkowski G. P., and Brouwer R. L. (2019), Modeling the transition to high sediment concentrations as a response to channel deepening in the Ems River Estuary, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(3), 1578-1594.
- Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P., and Babin M. (2009), Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81(3), 321-332.
- Druine F., Verney R., Deloffre J., Lemoine J.-P., Chapalain M., Landemaine V., and Lafite R. (2018), In situ high frequency long term measurements of suspended sediment concentration in turbid estuarine system (Seine Estuary, France): Optical turbidity sensors response to suspended sediment characteristics, *Marine Geology*, 400, 24-37.
- Elliott M., and McLusky D. S. (2002), The need for definitions in understanding estuaries, *Estuarine, coastal and*

- shelf science*, 55(6), 815-827.
- Fettweis M., Francken F., Van den Eynde D., Verwaest T., Janssens J., and Van Lancker V. (2010), Storm influence on SPM concentrations in a coastal turbidity maximum area with high anthropogenic impact (southern North Sea), *Continental Shelf Research*, 30(13), 1417-1427.
- Flipo N., Gallois N., Labarthe B., Baratelli F., Viennot P., Schuite J., Rivière A., Bonnet R., and Boé J. (2019), Pluri-annual water budget on the Seine basin: past, current and future trends.
- Geyer W. R. (2010), Estuarine salinity structure and circulation, *Contemporary issues in estuarine physics*, 12-26.
- Geyer W. R., and MacCready P. (2014), The Estuarine Circulation, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46, 175-197, doi:10.1146/annurev-fluid-010313-141302.
- Geyer W. R., Woodruff J., and Traykovski P. (2001), Sediment transport and trapping in the Hudson River estuary, *Estuaries*, 24(5), 670-679.
- GIP Loire Estuaire <http://www.loire-estuaire.org/dif/do/init>, edited.
- GIP Seine-Aval, and GPM Rouen <http://www.seine-aval.fr/reseau-synapses/>, edited.
- Grasso F., Bismuth E., and Verney R. (2019), CurviSeine Hindcast. IFREMER. <https://doi.org/10.12770/8f5ec053-52c8-4120-b031-4e4b6168ff29>.
- Grasso F., Bismuth E., and Verney R. (2021), Unraveling the impacts of meteorological and anthropogenic changes on sediment fluxes along an estuary-sea continuum, *Scientific reports*, 11(1), 1-11.
- Grasso F., and Caillaud M. (2023a), CurviLoire Hindcast. IFREMER. <https://doi.org/10.12770/a56f1a01-bdf2-4f52-9cc7-4e4b8605520c>.
- Grasso F., and Caillaud M. (2023b), A ten-year numerical hindcast of hydrodynamics and sediment dynamics in the Loire Estuary, *Scientific Data*, 10(1), 394.
- Grasso F., and Le Hir P. (2019), Influence of morphological changes on suspended sediment dynamics in a macrotidal estuary: diachronic analysis in the Seine Estuary (France) from 1960 to 2010, *Ocean Dynamics*, 69(1), 83-100.
- Grasso F., Le Hir P., and Bassoullet P. (2015), Numerical modelling of mixed-sediment consolidation, *Ocean Dynamics*, 65(4), 607-616.
- Grasso F., Verney R., Le Hir P., Thouvenin B., Schulz E., Kervella Y., Khojasteh Pour Fard I., Lemoine J.-P., Dumas F., and 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(1), 558-577, doi:10.1002/2017JC013185.
- Hesse R. F., Zorndt A., and Fröhle P. (2019), Modelling dynamics of the estuarine turbidity maximum and local net deposition, *Ocean Dynamics*, 69, 489-507.
- Horemans D. M., Dijkstra Y. M., Schuttelaars H. M., Sabbe K., Vyverman W., Meire P., and Cox T. J. (2021), Seasonal variations in flocculation and erosion affecting the large-scale suspended sediment distribution in the Scheldt estuary: the importance of biotic effects, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, e2020JC016805.
- Jalón-Rojas I., Schmidt S., and Sottolichio A. (2015), Turbidity in the fluvial Gironde Estuary (southwest France) based on 10-year continuous monitoring: sensitivity to hydrological conditions, *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), 2805-2819, doi:10.5194/hess-19-2805-2015.
- Jalón-Rojas I., Schmidt S., Sottolichio A., and Bertier C. (2016), Tracking the turbidity maximum zone in the Loire Estuary (France) based on a long-term, high-resolution and high-frequency monitoring network, *Continental Shelf Research*, 117, 1-11, doi:10.1016/j.csr.2016.01.017.
- Kösters F., and Zorndt A. (2018), Ereignisgesteuerte Morphodynamik im Weserästuar (MorphoWeser). FuE-Abschlussbericht B3955. 02.04. 70223.
- Lazure P., and Dumas F. (2008), An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS), *Advances in Water Resources*, 31(2), 233-250.
- Le Floch J. (1961), Propagation de la marée dynamique dans l'estuaire de la Seine et la Seine Maritime, *Unpublished PhD dissertation, University of Paris, France*.
- Le Hir P., Cayocca F., and Waeles B. (2011), Dynamics of sand and mud mixtures: A multiprocess-based modelling strategy, *Continental Shelf Research*, 31(10), S135-S149, doi:10.1016/j.csr.2010.12.009.
- Lesser G. R., Roelvink J. A., van Kester J. A. T. M., and Stelling G. S. (2004), Development and validation of a three-dimensional morphological model, *Coastal Engineering*, 51(8-9), 883-915, doi:10.1016/j.coastaleng.2004.07.014.
- MacCready P., and Geyer W. R. (2010), Advances in estuarine physics, *Annual review of marine science*, 2(1), 35-58.
- McSweeney J. M., Chant R. J., and Sommerfield C. K. (2016), Lateral variability of sediment transport in the Delaware E estuary, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(1), 725-744.

- Morris A., Mantoura R., Bale A., and Howland R. (1978), Very low salinity regions of estuaries: important sites for chemical and biological reactions, *Nature*, 274(5672), 678-680.
- Nidzieko N., and Ralston D. (2012), Tidal asymmetry and velocity skew over tidal flats and shallow channels within a macrotidal river delta, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C3).
- Orseau S., Lesourd S., Huybrechts N., and Gardel A. (2017), Hydro-sedimentary processes of a shallow tropical estuary under Amazon influence. The Mahury Estuary, French Guiana, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 189, 252-266.
- Petit J. C., Schäfer J., Coynel A., Blanc G., Deycard V. N., Derriennic H., Lancelleur L., Dutruch L., Bossy C., and Mattielli N. (2013), Anthropogenic sources and biogeochemical reactivity of particulate and dissolved Cu isotopes in the turbidity gradient of the Garonne River (France), *Chemical geology*, 359, 125-135.
- Postma L., and Hervouet J. M. (2007), Compatibility between finite volumes and finite elements using solutions of shallow water equations for substance transport, *International journal for numerical methods in fluids*, 53(9), 1495-1507.
- Pritchard D. W. (1967), What is an estuary: physical viewpoint, American Association for the Advancement of Science.
- Ralston D. K., and Geyer W. R. (2019), Response to channel deepening of the salinity intrusion, estuarine circulation, and stratification in an urbanized estuary, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(7), 4784-4802.
- Ralston D. K., Warner J. C., Geyer W. R., and Wall G. R. (2013), Sediment transport due to extreme events: The Hudson River estuary after tropical storms Irene and Lee, *Geophysical Research Letters*, 40(20), 5451-5455.
- Ralston D. K., Yellen B., Woodruff J. D., and Fernald S. (2020), Turbidity hysteresis in an estuary and tidal river following an extreme discharge event, *Geophysical Research Letters*, 47(15), e2020GL088005.
- Reese L., Gräwe U., Klingbeil K., Li X., Lorenz M., and Burchard H. (2024), Local mixing determines spatial structure of diahaline exchange flow in a mesotidal estuary: A study of extreme runoff conditions, *Journal of Physical Oceanography*, 54(1), 3-27.
- Roest M. R., Vollebregt E. A., ten Cate E., and Lin H.-X. (1995), Structured parallelisation of the flow simulation package TRIWAQ, paper presented at High-Performance Computing and Networking: International Conference and Exhibition Milan, Italy, May 3-5, 1995 Proceedings 3, Springer.
- Roland A., and Arduin F. (2014), On the developments of spectral wave models: numerics and parameterizations for the coastal ocean, *Ocean Dynamics*, 64(6), 833-846.
- Schmidt S., Etcheber H., Sottolichio A., and Castaing P. (2016), Bilan de 10 ans de suivi haute-fréquence de la qualité des eaux de l'estuaire de la Gironde, *system*, 97, 98.
- Schulz E., Grasso F., Le Hir P., Verney R., and Thouvenin B. (2018), Suspended Sediment Dynamics in the Macrotidal Seine Estuary (France): 2. Numerical Modeling of Sediment Fluxes and Budgets Under Typical Hydrological and Meteorological Conditions, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(1), 578-600, doi:10.1002/2016JC012638.
- Simpson J. H., Brown J., Matthews J., and Allen G. (1990), Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification, *Estuaries*, 13, 125-132.
- Sommerfield C. K., and Wong K. C. (2011), Mechanisms of sediment flux and turbidity maintenance in the Delaware Estuary, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 116(C1), doi:Artn C01005
10.1029/2010jc006462.
- Sottolichio A., and Castaing P. (1999), A synthesis on seasonal dynamics of highly-concentrated structures in the Gironde estuary, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 329(11), 795-800.
- Stacey M. T., Burau J. R., and Monismith S. G. (2001), Creation of residual flows in a partially stratified estuary, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C8), 17013-17037.
- Toublanc F., Brenon I., and Coulombier T. (2016), Formation and structure of the turbidity maximum in the macrotidal Charente estuary (France): Influence of fluvial and tidal forcing, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 169, 1-14, doi:10.1016/j.ecss.2015.11.019.
- Uncles R., Stephens J., and Smith R. (2002), The dependence of estuarine turbidity on tidal intrusion length, tidal range and residence time, *Continental shelf research*, 22(11-13), 1835-1856.
- Valle-Levinson A. (2010), *Contemporary issues in estuarine physics*, Cambridge University Press.
- Valle-Levinson A. (2022), *Introduction to estuarine hydrodynamics*, Cambridge University Press.
- van Gils J., Ouboter M., and De Rooij N. (1993), Modelling of water and sediment quality in the Scheldt estuary, *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 27, 257-265.
- van Kessel T., vanlede J., and de Kok J. (2011a), Development of a mud transport model for the Scheldt estuary,

- Continental Shelf Research*, 31(10), S165-S181.
- van Kessel T., Winterwerp H., van Prooijen B., van Ledden M., and Borst W. (2011b), Modelling the seasonal dynamics of SPM with a simple algorithm for the buffering of fines in a sandy seabed, *Continental Shelf Research*, 31(10), S124-S134.
- van Maren D. S., van Kessel T., Cronin K., and Sittoni L. (2015a), The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration, *Continental Shelf Research*, 95, 1-14.
- van Maren D. S., Winterwerp J. C., and Vroom J. (2015b), Fine sediment transport into the hyper-turbid lower Ems River: the role of channel deepening and sediment-induced drag reduction, *Ocean Dynamics*, 65(4), 589-605, doi:10.1007/s10236-015-0821-2.
- Verney R., Le Berre D., Repecaud M., Bocher A., Bescond T., Poppeschi C., and 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*, 471, 107281.
- Wei X., Garnier J., Thieu V., Passy P., Le Gendre R., Billen G., Akopian M., and Laruelle G. G. (2022), Nutrient transport and transformation in macrotidal estuaries of the French Atlantic coast: a modeling approach using the Carbon-Generic Estuarine Model, *Biogeosciences*, 19(3), 931-955.
- Winterwerp J. C., and Wang Z. B. (2013), Man-induced regime shifts in small estuaries—I: theory, *Ocean Dynamics*, 63(11-12), 1279-1292.
- Winterwerp J. C., Wang Z. B., van Braeckel A., van Holland G., and Kösters F. (2013), Man-induced regime shifts in small estuaries—II: a comparison of rivers, *Ocean Dynamics*, 63(11-12), 1293-1306.

10. ANNEXE : ILLUSTRATION D'UN REJEU NUMERIQUE (MODELE *CURVILOIRE*)

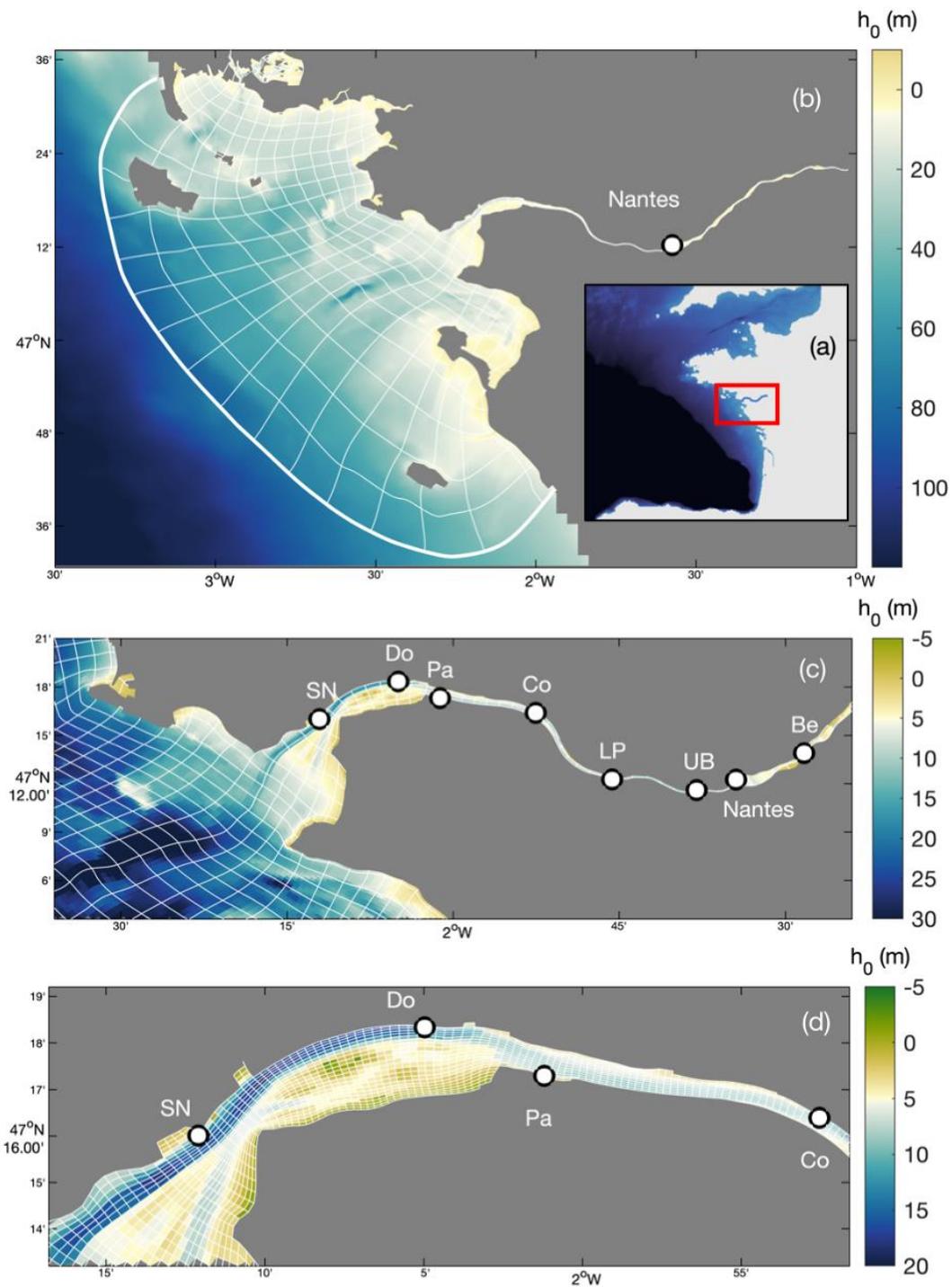


Figure 23. Bathymétrie de l'estuaire de la Loire (avec h_0 la profondeur d'eau par rapport au niveau moyen de la mer). (a) Localisation de l'estuaire dans le Golfe de Gascogne, (b) domaine complet du modèle MARS3D, représentation d'une maille sur dix, (c) zoom sur l'estuaire et son embouchure, représentation d'une maille sur cinq, (d) zoom sur l'estuaire aval, représentation de toutes les mailles. Les symboles représentent les stations de mesures à Saint Nazaire 'SN', Donges 'Do', Paimboeuf 'Pa', Cordemais 'Co', Le Pellerin 'LP', Usine Brulée 'UB' et Bellevue 'Be'. Figure issue de Grasso and Caillaud [2023b].

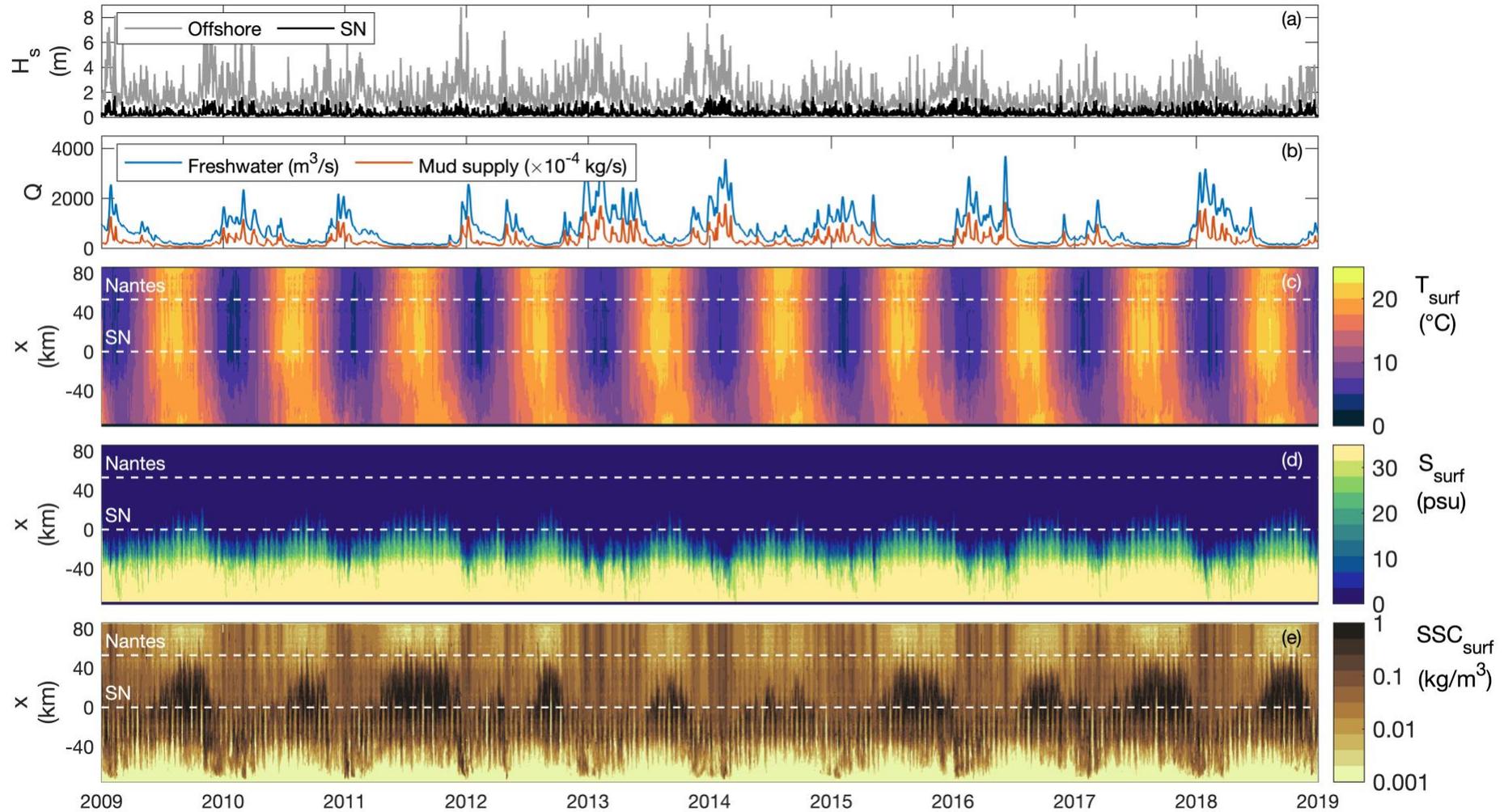


Figure 24. Rejeu numérique de l'estuaire de la Loire (2009-2018). (a) Hauteur significative des vagues H_s au large (gris) et à Saint Nazaire 'SN' (noir), et (b) débit Q de la Loire en amont des apports liquides (bleu) et solides (orange). Évolution temporelle longitudinale (moyennée sur la largeur) en surface de : (c) la température T_{surf} , (d) la salinité S_{surf} et (e) la concentration des sédiments en suspension SSC_{surf} . Dans (c-e), les lignes blanches tiretées représentent les localisations de Saint Nazaire 'SN' et Nantes. Figure issue de Grasso and Caillaud [2023b].

11. ANNEXE : CARACTERISATION DES PROCESSUS HYDRO-SEDIMENTAIRES ESTUARIENS

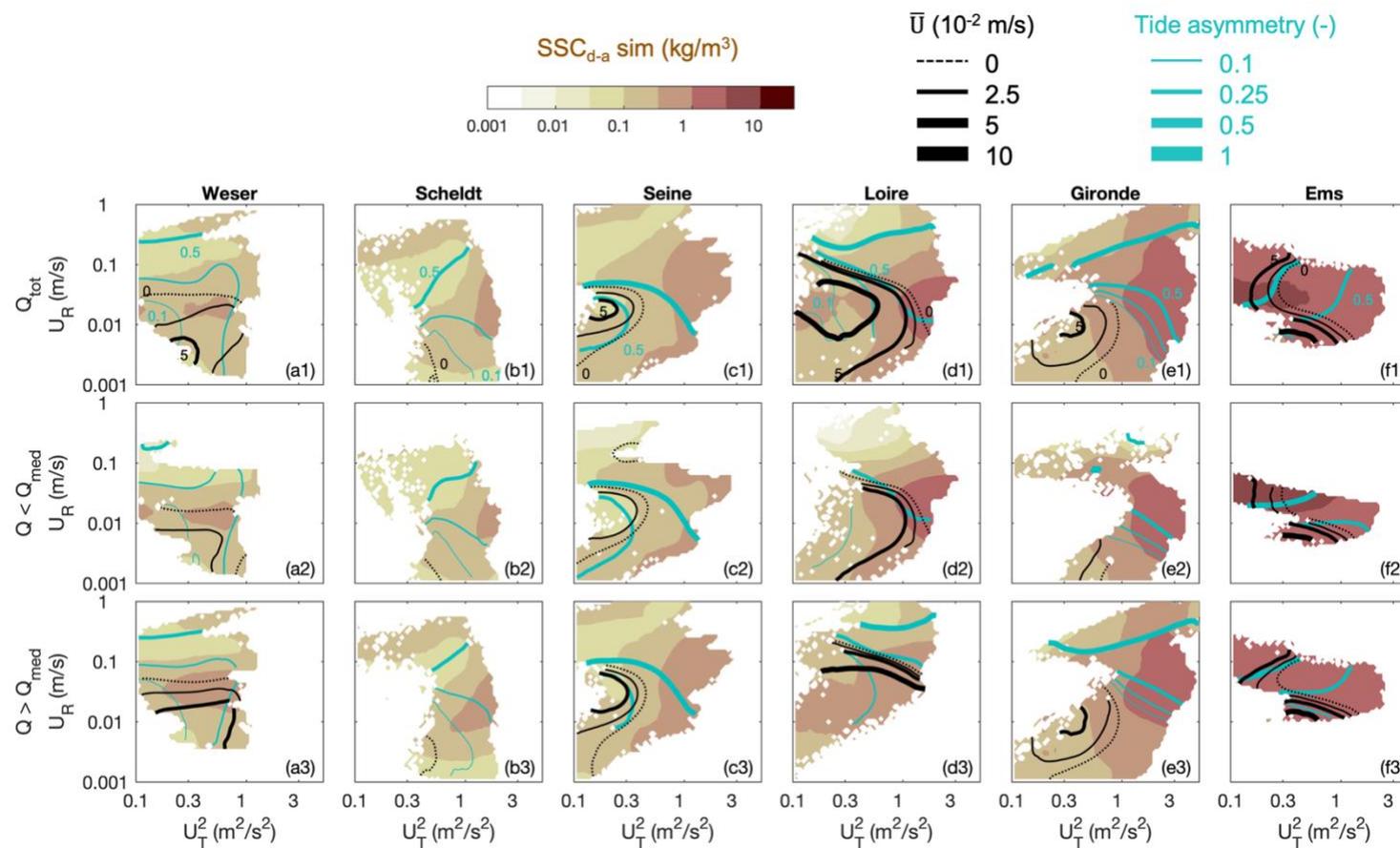


Figure 25. Diagramme $U_R-U_T^2$ (avec U_R la vitesse fluviale et U_T la vitesse tidale, cf. Annexe 13), illustrant les processus hydro-sédimentaires simulés sur les 6 estuaires pour : (bas) des conditions de débits forts ($Q > \text{médiane annuelle } Q_{med}$), (milieu) des conditions de débits faibles ($Q < Q_{med}$), et (haut) tous les débits ($Q = Q_{tot}$). La couleur représente la concentration en MES moyennée sur la colonne d'eau SSC_{d-a} , les contours turquoise représentent l'asymétrie de marée [Nidzioko and Ralston, 2012] (proportionnelle au rapport des durées de jusant et de flot), et les contours noirs représentent la circulation résiduelle \bar{U} . Les diagrammes sont construits comme l'interpolation des données moyennées par cycle de marée en tous points du profil 1DH sur an.

12. ANNEXE : NOTE TECHNIQUE SUR LA METHODE D'ESTIMATION DU MAXIMUM DE TURBIDITE ESTUARIENNE (ESTUMAX)

Cette annexe présente la méthode ESTUMAX permettant d'estimer le maximum potentiel de turbidité des estuaires. Pour cela il est nécessaire de connaître :

- Le marnage à la limite aval TR_0 .
- Le débit sortant à la limite aval Q_0 .
- La profondeur d'eau représentative de l'estuaire h_m .
- La largeur représentative de l'estuaire w_m .

La profondeur (resp. largeur) représentative est calculée comme la médiane de la profondeur $h(x)$ (resp. largeur $w(x)$) le long du talweg entre les limites amont et aval (Figure 26).

La limite amont est définie comme la limite d'influence de la marée, quand le marnage devient plus faible que 10% de la colonne d'eau (*i.e.* $TR/h < 0.1$). La limite aval est définie au niveau du maximum du gradient horizontal de salinité de fond (dS_b/dx). Si la distribution longitudinale de la salinité n'est pas connue, on définit la limite aval au niveau du nombre de Froude $Fr_x = 0,002$. Celui-ci se calcule localement comme :

$$Fr_x = U_{Rx} / (\beta g S_o h_x)^{\frac{1}{2}} \quad \text{avec} \quad U_{Rx} = Q / (h_x \cdot w_x) \quad (7)$$

où h_x et w_x sont les variables locales (*i.e.* longitudinales), $\beta = 7,7 \times 10^{-4}$ est le coefficient de contraction haline, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ est la constante de gravité, $S_o = 35,5 \text{ psu}$ est la salinité de référence à l'embouchure.

Par exemple dans le cas de l'estuaire de la Vilaine (Figure 27), en connaissant la profondeur du chenal principal et la largeur de l'estuaire, il est possible de calculer localement le nombre de Froude Fr_x et de déterminer la limite aval à $x = 12 \text{ km}$ (Figure 28).

Une fois les limites amont et aval déterminées, il est possible de calculer les nombres de Froude Fr_s et de mélange M_s intégrés sur la longueur de l'estuaire, tels que :

$$Fr_s = U_{Rs} / (\beta g S_o h_m)^{\frac{1}{2}} \quad \text{avec} \quad U_{Rs} = Q / (h_m \cdot w_m) \quad (8)$$

$$M_s = [(C_D U_{Ts}^2) / (\omega N_{0m} h_m^2)]^{\frac{1}{2}} \quad \text{avec} \quad U_{Ts} \approx \alpha (TR_0 / h_m) \quad \text{et} \quad N_{0m} = (\beta g S_o / h_m)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

où $C_D = 3 \times 10^{-3}$ est le coefficient de traînée au fond, $\omega = 2,24 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ est la fréquence tidale et $\alpha = 2$ est un paramètre empirique.

Il est ensuite possible de reporter les valeurs du couple M_s - Fr_s sur le diagramme ESTUMAX (Figure 29) afin d'estimer le maximum potentiel de turbidité dans l'estuaire.

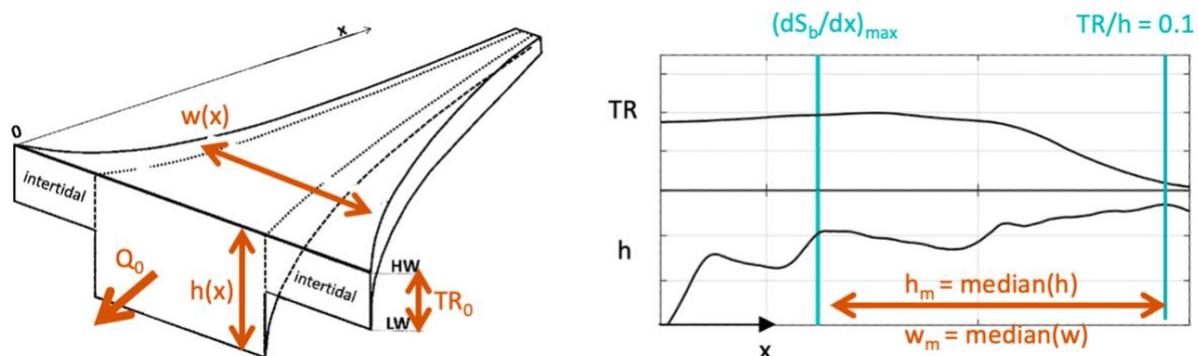


Figure 26. Schéma représentatif des grandeurs caractéristiques nécessaires au calcul des nombres de mélange et de Froude simplifiés.

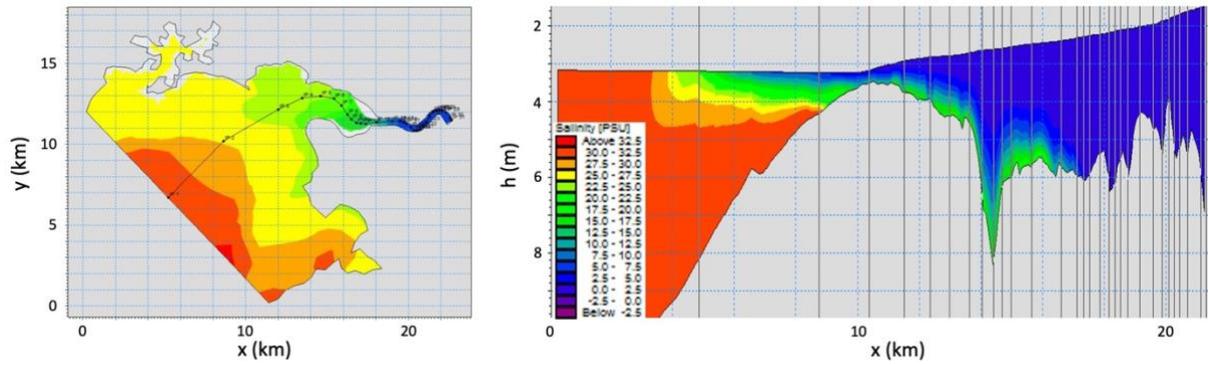


Figure 27. Distribution de la salinité dans l'estuaire de la Vilaine : (gauche) vue spatialisée de la salinité moyenne et (droite) vue longitudinale à l'échelle de basse mer en vive eau le long du profil représenté sur la figure de gauche (source : EPTB Vilaine).

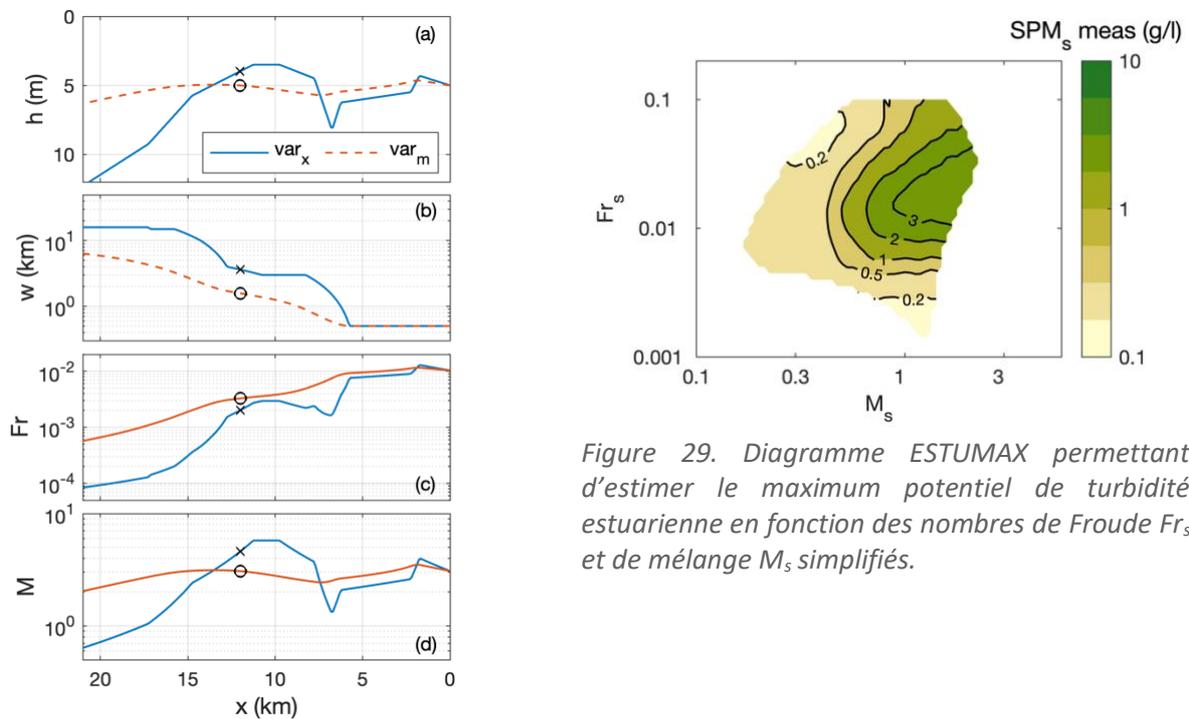


Figure 28. Évolution longitudinale (selon x) dans l'estuaire de la Vilaine : (a) de la profondeur h , (b) de la largeur w , (c) du nombre de Froude Fr et (d) du nombre de mélange M , pour les variables locales (var_x , trait plein) et intégrées entre l'amont et le point x (var_m , tiretés). Les symboles représentent la position de la limite aval pour $Fr = 0,002$.

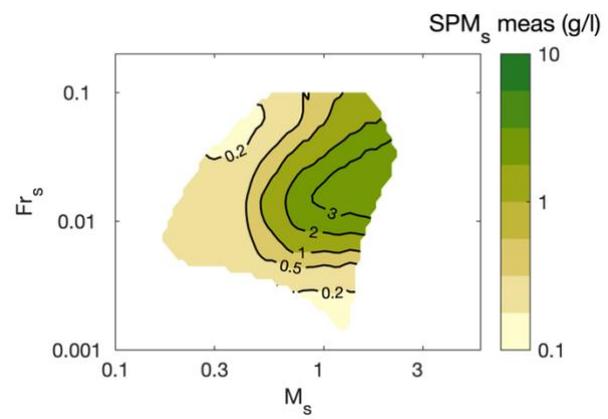


Figure 29. Diagramme ESTUMAX permettant d'estimer le maximum potentiel de turbidité estuarienne en fonction des nombres de Froude Fr_s et de mélange M_s simplifiés.

13. ANNEXE : NOTE TECHNIQUE SUR LES DONNEES ESTUARIENNES DISPONIBLES

Note rédigée par Eliott Bismuth dans le cadre de son CDD financé par le projet CAPTURE.

13.1. ARCHITECTURE DU DOSSIER CAPTURE

Tous les fichiers relatifs au projet CAPTURE sont sur Datarmor à l'adresse /home/datawork-dhysed/PROJETS/CAPTURE, noté CAPTURE dans la suite.

Ce répertoire est organisé de la manière suivante :

- ⊗ CAPTURE
 - ⊗ model
 - ⊗ [ESTUAIRE]
 - (=SEINE, LOIRE, GIRONDE, EMS, ELBE, WESER, SCHELDT)
 - ⊗ raw
 - fichiers bruts aux formats spécifiques à chaque modèle. Les fichiers bruts des estuaires français sont lus depuis leurs emplacements courants (ARES pour la Seine, LOIRE et AMORAD).
 - ⊗ processed
 - fichiers pré-formatés dans un format commun à tous les estuaires. Le détail du pre-processing est détaillé plus loin.
 - ⊗ measurements
 - ⊗ [ESTUAIRE]
 - (=SEINE, LOIRE, GIRONDE, EMS, ELBE, WESER, SCHELDT)
 - ⊗ raw
 - fichiers de données brutes
 - ⊗ processed
 - fichiers préformatés
 - ⊗ figures
 - ⊗ [ESTUAIRE]
 - (=SEINE, LOIRE, GIRONDE, EMS, ELBE, WESER, SCHELDT)
 - figures des domaines de chaque estuaires, avec la grille de calcul et la bathymétrie des modèles, la position des points de thalweg et des stations de mesures.
 - ⊗ scripts
 - tous les scripts (Python, Matlab, bash) utilisés pour CAPTURE
 - ⊗ work_files
 - ⊗ [ESTUAIRE]
 - fichiers finaux



Les scripts utilisés dans la suite sont basés sur cette architecture.

Les bibliothèques suivantes sont nécessaires pour utiliser l'ensemble des routines Python du projet CAPTURE (leur installation est détaillée dans les documentations respectives en ligne) :

[NumPy](#)
[Pandas](#)
[GeoPy](#)

[Xarray](#)
[SciPy](#)

[Matplotlib](#)
[Cartopy](#)

[cmocean](#)
[osgeo](#)

13.2. TRAITEMENT DES SORTIES DE MODELES

Pré-traitement des sorties brutes

Les estuaires étudiés ont été simulés numériquement avec des outils de modélisation variés, les formats de sorties sont donc différents. Une première étape de traitement de ces fichiers consiste à créer des fichiers intermédiaires avec un format homogène. Ce travail est propre à chaque estuaire, puisque chaque estuaire a un format spécifique de sorties brutes. Les routines Python permettant ce pre-processing ont la nomenclature suivante :

`process_model_[Estuaire].py`, avec `[Estuaire]` = Seine, Loire, Gironde, etc ...

Pour chaque estuaire, la routine correspondante lit les fichiers de sorties bruts dans le répertoire `/CAPTURE/model/[ESTUAIRE]/raw`, sauf pour les estuaires français (Seine, Loire et Gironde), pour lesquels les fichiers bruts sont dans leur archives respectives (répertoires ARES, LOIRE et AMORAD). La routine crée en sortie 2 fichiers NetCDF4, dans le répertoire `/CAPTURE/model/[ESTUAIRE]/processed` :

`[Estuaire]_morpho3d_[année].nc`

`[Estuaire]_hydro2dv_[année].nc`

Pour l'Ems, 2 simulations sont disponibles par année, la nomenclature est de la forme :

`Ems_morpho3d_[année]_run[XX].nc`

`Ems_hydro2dv_[année]_run[XX].nc`

Pour chaque estuaire, le fichier *morpho3d* contient les paramètres de la grille bathymétrique (dimensions des cellules *dx* et *dy*, et profondeur *H0*) ainsi que l'élévation de la surface ζ (*XE* dans les fichiers) si cette variable est disponible sur tout le domaine (ce n'est pas le cas pour tous les estuaires, certains ne l'ont qu'aux points de thalweg, auquel cas la dimension *time* et la variable *XE* n'apparaissent pas dans le fichier *morpho3d*).

Le fichier *hydro2dv* contient les paramètres physiques aux points du thalweg, extraits en surface -1m (variable avec le suffixe *_surface*), au fond +1m (suffixe *_bottom*), et moyennés sur la verticale (suffixe *_depth_averaged*). Le détail de ces paramètres et de leur disponibilité selon les estuaires est donné dans le Tableau 4.

Dans les routines `process_model_[Estuaire].py`, l'utilisateur doit spécifier l'année de la simulation (même si une seule année est disponible pour l'estuaire voulu), le numéro de simulation dans le cas de l'Ems, ainsi que le chemin racine du répertoire CAPTURE depuis le répertoire d'exécution du script. Selon les estuaires, cette étape de traitement peut-être assez longue, mais il est possible de l'exécuter sur Datarmor en PBS, via le script *shell* `pybatch_process_model` en spécifiant le nom du script *Python* à exécuter (avec le nom de l'estuaire), et en modifiant dans ce dernier le chemin du répertoire CAPTURE (chemin relatif depuis Datarmor).

Tableau 4. Paramètres et dimensions des variables des fichiers morpho3d et hydro2dv.

	Seine	Loire	Gironde	Elbe	Ems	Scheldt	Weser	
	1995 (b) 2015 2016 (b) 2017 2018	2009 (b) 2015 2016 2017 2018	2015 (b) 2016 2017 2018	2013 (b)	1965 (x2) 1985 (x2) 2005 (x2) (b)	2006 (b)	2016 (b)	
<i>morpho3d</i>	<i>dims</i>	<i>time</i> (dt=30min) <i>ni</i> (599) <i>nj</i> (132)	<i>time</i> (dt=30min) <i>ni</i> (366) <i>nj</i> (55)	<i>time</i> (dt=1h) <i>ni</i> (371) <i>nj</i> (50)	<i>ni</i> (614) <i>nj</i> (301)	<i>ni</i> (511) <i>nj</i> (22)	<i>ni</i> (2948) <i>nj</i> (379)	<i>time</i> (dt=30min) <i>ni</i> (16) <i>nj</i> (52)
	<i>vars</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, dx, dy, surf</i> <i>XE</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, dx, dy, surf</i> <i>XE</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, dx, dy, surf</i> <i>XE</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, dx, dy</i> <i>XE</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, dx, dy,</i> <i>Ht</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, dx, dy</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, dy</i> <i>XE</i>
<i>hydro2dv</i>	<i>dims</i>	<i>time</i> (dt=30min) <i>ni</i> (599)	<i>time</i> (dt=30min) <i>ni</i> (366)	<i>time</i> (dt=1h) <i>ni</i> (371)	<i>time</i> (dt=1h) <i>time_hf</i> (dt=10min) <i>ni</i> (371)	<i>time</i> (dt=30min) <i>ni</i> (9)	<i>time</i> (dt=10min) <i>ni</i> (185)	<i>time</i> (dt=30min) <i>ni</i> (1011)
	<i>vars</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, dx, dy, surf</i> <i>XE</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, dx, dy, surf</i> <i>XE</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, dx, dy, surf</i> <i>XE</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, dx</i> <i>XE</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, X</i> <i>XE, Ht</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>H0, X</i> <i>XE, Ht</i>	<i>longitude, latitude</i> <i>dx, H0</i> <i>XE, Ht</i>
		<i>j_thalweg</i>	<i>j_thalweg</i>	<i>j_thalweg</i>		<i>j_thalweg</i>	<i>j_thalweg</i>	<i>j_thalweg</i>
		<i>SAL_depth_averaged</i>	<i>SAL_depth_averaged</i>	<i>SAL_depth_averaged</i>	<i>SAL_depth_averaged</i>	<i>SAL_depth_averaged</i>	<i>SAL_depth_averaged</i>	<i>SAL_depth_averaged</i>
		<i>SAL_surface</i>	<i>SAL_surface</i>	<i>SAL_surface</i>	<i>SAL_surface</i>	<i>SAL_surface</i>	<i>SAL_surface</i>	<i>SAL_surface</i>
		<i>SAL_bottom</i>	<i>SAL_bottom</i>	<i>SAL_bottom</i>	<i>SAL_bottom</i>	<i>SAL_bottom</i>	<i>SAL_bottom</i>	<i>SAL_bottom</i>
		<i>SSC_depth_averaged</i>	<i>SSC_depth_averaged</i>	<i>SSC_depth_averaged</i>		<i>SSC_depth_averaged</i>	<i>SSC_depth_averaged</i>	<i>SSC_depth_averaged</i>
		<i>SSC_surface</i>	<i>SSC_surface</i>	<i>SSC_surface</i>		<i>SSC_surface</i>	<i>SSC_surface</i>	<i>SSC_surface</i>
		<i>SSC_bottom</i>	<i>SSC_bottom</i>	<i>SSC_bottom</i>		<i>SSC_bottom</i>	<i>SSC_bottom</i>	<i>SSC_bottom</i>
		<i>UZ_depth_averaged</i>	<i>UZ_depth_averaged</i>	<i>UZ_depth_averaged</i>	<i>UZ_depth_averaged</i>	<i>UZ_depth_averaged</i>	<i>UZ_depth_averaged</i>	<i>UZ_depth_averaged</i>
		<i>UZ_surface</i>	<i>UZ_surface</i>	<i>UZ_surface</i>		<i>UZ_surface</i>	<i>UZ_surface</i>	<i>UZ_surface</i>
		<i>UZ_bottom</i>	<i>UZ_bottom</i>	<i>UZ_bottom</i>		<i>UZ_bottom</i>	<i>UZ_bottom</i>	<i>UZ_bottom</i>
		<i>Q</i>	<i>Q</i>	<i>Q</i>	<i>Q</i>	<i>Q</i>	<i>Q</i>	<i>Q</i>

Traitement par marées

La suite du traitement des sorties de modèles consiste à extraire et calculer plusieurs paramètres pour chaque marée en chaque point du thalweg. Après avoir préformaté les sorties des différents modèles, la routine permettant ce travail est commune à tous les estuaires :

thalweg_model_by_tides.py

Dans cette routine, l'utilisateur doit spécifier le nom de l'estuaire, l'année de la simulation ainsi que le numéro de simulation dans le cas de l'Ems (cette information n'est pas lue pour les autres estuaires), ainsi que le chemin du répertoire CAPTURE. Il est possible de lancer ce script en PBS sur Datarmor via le lanceur pybatch_thalweg_model_by_tides, en modifiant le chemin du répertoire CAPTURE dans thalweg_model_by_tides.py en conséquence.

Cette routine lit les fichiers *morpho3d* et *hydro2dv* puis interpole les variables du fichier *hydro2dv* à une résolution temporelle $dt = 10$ minutes, pour détecter avec une meilleure précision les débuts et fin de marée. La détection des marées est effectuée en chaque point de thalweg sur la série annuelle de niveau d'eau. Pour ce faire, les points de *zero-upcrossings* (passage de valeur négative à valeur positive) de la dérivée temporelle de l'élévation de surface sont détectés ; ils correspondent aux marées basses. Une marée individuelle est définie entre deux marées basses. La marée haute d'une marée individuelle est définie par le maximum de l'élévation de surface entre les deux marées basses (Figure 30).

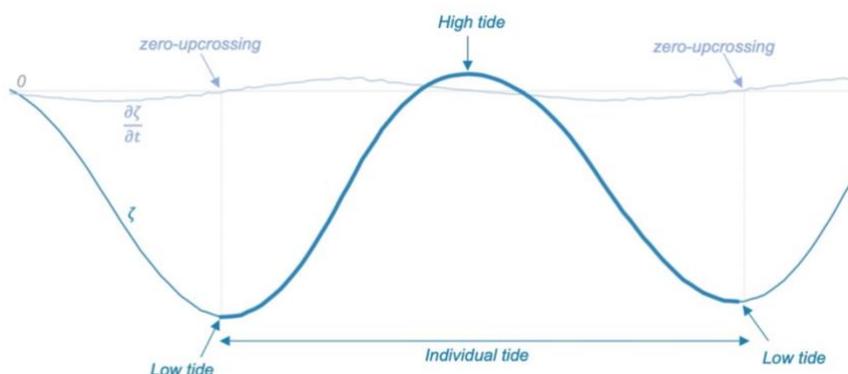


Figure 30. Schéma de la méthode de détection des marées.

En amont de certains estuaires, l'élévation de surface est très fortement modulée par le débit, ce qui peut rendre la détection des marées difficile. Ainsi, un critère de durée est mis en place pour filtrer les marées détectées ; pour qu'une marée soit valide, il faut qu'elle dure au moins 10 heures, et moins de 14 heures, puisque les marées en Atlantique Nord et Manche ont une période d'environ 12,4 heures. Ceci implique que le nombre de marées détectées en aval est supérieur à celui en amont, car le signal est quasi sinusoïdal en aval, donc facilement identifiable, et très déformé en amont, où l'algorithme peut filtrer un plus grand nombre de marées.

Plusieurs paramètres sont calculés à marée haute (*HW* pour *high-water*) et marée basse (*LW* pour *low-water*), pour chaque marée :

- profondeur du thalweg : $Ht_{LW,HW} = H_0 + \zeta_{LW,HW}$
- largeur de l'estuaire : $Ls_{LW,HW} = \sum_{nj} dy^{wet_{LW,HW}}$
- section verticale : $Av_{LW,HW} = \sum_{nj} (H_0 + \zeta_{LW,HW}) \times dy^{wet_{LW,HW}}$

avec dy^{wet} la taille des cellules mouillées dans la direction orthogonale à l'estuaire.

Les paramètres suivants sont calculés pour chaque marée :

- marnage : $TR = \zeta_{HW} - \zeta_{LW}$
- débit : $Q_t = Q_{HW}$
- vitesse associé au débit : $U_r = Q_t / Av_t$
- fréquence de flottabilité : $N_0 = (\beta g s_{ocean} / H_t)^{1/2}$
 $\beta = 7.7 \times 10^{-4}$ est le coefficient de contraction haline,
 $g = 9.81$ est la constante de gravité,
 $s_{ocean} = 35.5$ est la salinité de référence à l'embouchure,
 H_t est la profondeur moyenne sur une marée.
- nombre de Froude en eau douce : $Fr_f = U_r / (\beta g s_{ocean} H_t)^{1/2}$
- paramètre de mélange : $M^2 = (C_D U_r^2) / (\omega N_0 H_t^2)$
 $C_D = 3 \times 10^{-3}$ est le coefficient de traînée au fond,
 $\omega = 1 / (12.4 \times 3600)$ est la fréquence tidale.
- flottabilité : $b_x = -g\beta \partial s / \partial x$
- nombre de Simpson : $Si = (b_x H_t^2) / (C_D u_{max}^2)$
- stratification verticale normalisée : $\Delta s / s_0 = 10 U_r^{4/5} / (u_{max}^{2/5} (\beta g s_0 H_t)^{1/5})$
- asymétrie de durée tidale: $Asymmetry = t_{flood} / t_{ebb}$
- skewness de vitesse de courants tidaux : $Skewness = |u_{max}| / |u_{min}|$
- skewness de moment de courant de fond : $\gamma_0(U_{bot})$
- asymétrie de moment de durée tidale : $\gamma_0(\zeta_t)$
avec $\gamma_0(x) = \mu_3 / \mu_2^{3/2}$ et $\mu_m = \frac{1}{N-1} \sum_N x^m$

Les paramètres calculés à partir de la vitesse des courants u_{max} , u_{min} le sont à partir des courants de fond, excepté pour l'Elbe, où seuls les courants barotropes (moyennés sur la verticale) sont disponibles.

De plus, les moyennes tidales de la salinité (SAL) et de la concentration de sédiment en suspension (SSC) en surface (suffixe s_tavg pour *surface tide averaged*), au fond ($b_tavg = bottom\ tide\ averaged$), et en moyenne verticale ($da_tavg = depth\ averaged\ tide\ averaged$) sont calculées, ainsi que la valeur maximale de la concentration en surface (s_tmax), au fond (b_tmax) et en moyenne verticale (da_tmax).

Les paramètres des fichiers *hydro2dv* interpolés à 10 minutes sont ajoutés au fichier de sortie de la routine. Le fichier de sortie est nommé selon :

[Estuaire]_[année]_thalweg_model.nc ou

[Estuaire]_[année]_run[XX]_thalweg_model.nc pour l'Ems.

Ces fichiers sont écrits dans le répertoire CAPTURE/work_files/[ESTUAIRE].

Le détail des variables disponibles dans ces fichiers est donné dans le Tableau 5.

Tableau 5. Paramètres des fichiers thalweg_model.

		Seine	Loire	Gironde	Elbe	Ems	Scheldt	Weser	
		1995 (b) 2015 2016 (b) 2017 2018	2009 (b) 2015 2016 2017 2018	2015 (b) 2016 2017 2018	2013 (b)	1965 (x2) 1985 (x2) 2005 (x2)	2006 (b)	2016 (b)	
variables	description								
par marée	<i>id</i> _[LW1, LW2, HW]	indices temporels des marées [<i>basses début, basses fin, hautes</i>]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>Ht</i> _[LW, HW]	profondeurs totales aux marées [<i>basses, hautes</i>]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>Ls</i> _[LW, HW]	largeurs de section aux marées [<i>basses, hautes</i>]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
	<i>Av</i> _[LW, HW]	aires de section vertical aux marées [<i>basses, hautes</i>]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
	<i>TR</i>	marnage	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>Qt</i>	débit à marées hautes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>Ur</i>	vitesse associées aux débits par marées	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
	<i>Fr</i>	nombre de Froude	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
	<i>M2</i>	paramètre de mélange	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>Skewness</i>	skewness de vitesse de courants tidaux	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>Asymmetry</i>	asymétrie de durée tidale	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>gam0_Zt</i>	asymétrie de moment de durée tidale	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>gam0_Ub</i>	skewness de moment de courant de fond	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>bx</i>	flottabilité	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>Si</i>	nombre de Simpson	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>Sz</i>	stratification verticale normalisée	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
	<i>SAL</i> [b, s, da]_tavg	salinité moyenne par marée en [<i>fond, surface, moyenne verticale</i>]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>SSC</i> [b, s, da]_tavg	SSC moyenne par marée en [<i>fond, surface, moyenne verticale</i>]	✓	✓	✓		✓	✓	✓	
<i>SSC</i> [b, s, da]_tmax	SSC maximale par marée en [<i>fond, surface, moyenne verticale</i>]	✓	✓	✓		✓	✓	✓	
haute fréquence	<i>XE</i>	élévation de surface	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>dXE</i>	dérivée temporelle de l'élévation de surface	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>U</i> _[baro, bott, surf]	vitesse longitudinale des courants [<i>barotrope, fond, surface</i>]	✓	✓	✓	<i>U_baro</i>	✓	✓	✓
	<i>SAL</i> _[davg, bott, surf]	salinité [<i>moyenne verticale, fond, surface</i>]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>SSC</i> _[davg, bott, surf]	SSC [<i>moyenne verticale, fond, surface</i>]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>Qh</i>	débit	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>M</i> [0, 2, 4]_amp	amplitude des ondes de marées [<i>sub-tidale, M2, M4</i>]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>M</i> [2, 4]_phi	phase des ondes de marées [<i>M2, M4</i>]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

La simulation numérique de l'Elbe ne comprend pas de dynamique sédimentaire, il n'y a donc pas de sorties SSC, et les sorties de courants longitudinaux ne concernent que la moyenne verticale (courants barotropes); il n'y a pas de discrétisation en surface et au fond. Pour la Weser, les variables « morphologiques » ne sont disponibles que pour certaines *cross-sections* des sorties du modèles, ces variables ont donc une résolution longitudinales différentes des autres (ni_{cs} au lieu de ni); elles sont notés ✓ dans le Tableau 5.

Décomposition harmonique de la marée

Une décomposition harmonique de la marée est effectuée à partir du script *Matlab* :

```
s_tide_estuaries.m
```

qui se base sur la toolbox [S_TIDE](#) (Pan, 2018) pour extraire les amplitudes des ondes sub-tidales, M2 et M4, et les phases des ondes M2 et M4 à partir de l'élévation de surface haute-fréquence (XE) du fichier *thalweg_model*. Dans cette routine *Matlab*, l'utilisateur doit indiquer le(s) fichier(s) *thalweg_model* à traiter dans la variables *files*, ainsi que le chemin du répertoire *CAPTURE/work_files* dans la variable *path*, et l'emplacement du package *S_TIDE* dans la variable *root*. Ces variables se modifient dans la section *USER INPUTS*.

Ce script peut-être lancé en PBS via *matbatch_s_tide_estuaries* en modifiant les chemin *path* et *root* de *s_tide_estuaries.m* en conséquence.

Les paramètres de décomposition tidale sont enregistrés dans des fichiers intermédiaires dans *CAPTURE/work_files/stide_matfiles*, avec la nomenclature :

```
[Estuaire]_[année]_stide_parameters.mat
```

 ou

```
[Estuaire]_[année]_run[XX]_stide_parameters.mat
```

 pour l'Ems.

Ces paramètres sont enfin ajoutés aux fichiers *thalweg_model* via le script *Python* :

```
add_stide_to_thalweg_model_file.py
```

qui traite en une fois tous les fichiers de l'estuaire spécifié dans la variable *estuary* dans *USER INPUTS*. L'utilisateur doit aussi indiquer le chemin du répertoire *CAPTURE* dans la variable *root*.

13.3. TRAITEMENT DES DONNEES MESUREES

Pré-traitement des données brutes

Comme pour les sorties de modèles, la 1^{ère} étape de traitement des données mesurées consiste à homogénéiser leur format. Pour l'instant, ce travail n'a été réalisé que pour l'Elbe, l'Ems et la Weser, pour des données mesurées à haute fréquence (stations de mesures).

Les données brutes sont archivées dans */CAPTURE/measurements/[ESTUAIRE]/raw*, avec un sous-répertoire par paramètre mesuré. Pour l'Elbe et la Weser, les données ont été téléchargées depuis la base de données allemande www.kuestendaten.de. Pour l'Ems, les données ont été mis à disposition sur la base [INTERTIDE](#). La distinction est faite entre les stations de mesures hydrologiques, pour les mesures de turbidité, salinité et température, et les marégraphes, pour les mesures d'élévation de surface, car ces stations ne sont pas forcément située au même endroit.

Comme pour le pré-traitement des sorties de modèles, une routine *Python* est dédié au pré-traitement des données de chaque estuaire :

```
process_data_[ESTUAIRE].py
```

qui crée, dans le répertoire /CAPTURE/measurements/[ESTUAIRE]/processed, deux fichiers de sorties au format NetCDF4 :

[Estuaire]_[année]_elev_measurements.nc pour les élévations de surface,

[Estuaire]_[année]_hydro_measurements.nc pour les paramètres hydrologiques.

La profondeur de mesure des stations est considérée en surface si elle est effectuée à moins d'1 mètre sous la surface, et au fond sinon. Les profondeurs de mesures des stations de l'Elbe, l'Ems et la Weser sont indiquées dans le Tableau 6, avec le nom des stations, leur distance à l'embouchure (calculée à partir du point de thalweg du modèle le plus proche), et les paramètres mesurés pour chaque station. Dans ce tableau, *NHN* (*Normalhöhenull*) est la référence allemande d'élévation du niveau marin moyen. Les positions des stations de mesures hydrologiques et d'élévations de surface sont indiquées sur les figures en annexe. Les informations pour la Seine, la Loire et la Gironde sont détaillées dans le Tableau 7.

Traitement par marée

Le traitement par marée est similaire pour les données mesurées que pour les sorties des modèles, à la différence que les stations de mesures de niveaux d'eau sont (ou peuvent être) différentes des stations de mesures des paramètres hydrologiques. Ainsi, la routine :

```
thalweg_measurements_by_tides.py
```

détermine les indices de marées basses et hautes de la même manière que pour le modèle, pour les marégraphes, puis les paramètres tidaux des variables hydrologiques sont calculés pour les marées déterminées au marégraphe le plus proche. Ainsi, si la distance entre la station hydrologique et le marégraphe est importante, la marée peut être décalée, et les paramètres hydrologiques ne sont pas calculés exactement de marée basse à marée basse. Ce décalage ne pose pas de problème dans la mesure où la période de la marée n'est pas modifiée, et que le temps entre les indices de marées correspond toujours à un cycle de marée complet.

La routine produit 2 fichiers, un pour les paramètres hydrologiques, et un pour les paramètres relatifs à l'élévation de surface. Le choix de produire 2 fichiers distincts permet différencier les positions des stations de mesures hydrologiques et des marégraphes. Ces fichiers sont écrits dans CAPTURE/work_files/[ESTUAIRE] avec la nomenclature :

[Estuaire]_[année]_hydro_thalweg_measurements.nc et

[Estuaire]_[année]_elev_thalweg_measurements.nc.

Le contenu de ces fichiers est détaillé dans le Tableau 8.

Tableau 6. Noms, distances à l'embouchure, profondeur de mesure et paramètres mesurés des stations hydrologiques des estuaires de l'Elbe, l'Ems et la Weser.

	station	x (km)	profondeur	niveau	paramètres
Elbe 2012 2013 2014 2015	<i>LZ_4a</i>	19,0	fond+2.5m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>LZ_2a</i>	48,9	fond+2.5m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>LZ_1b</i>	55,7	fond+2.5m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>LZ_1</i>	59,1	fond+2.5m	fond	SSC
	<i>LZ_1a</i>	60,2	fond+2.5m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>LZ_rhinplate_nord</i>	76,4	surface-1m	surface	SSC,SAL,TEMP
			fond+2.5m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>LZ_pagensand_nord</i>	88,6	surface-1m	surface	SSC,SAL,TEMP
			fond+2.5m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>LZ_juelsand</i>	101,9	surface-1m	surface	SSC,SAL,TEMP
			fond+2.5m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>LZ_hanskalbsand</i>	110,2	surface-1m	surface	SSC,SAL,TEMP
			fond+2.5m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>Blankenese_WGMN</i>	119,3	surface-1m	surface	SSC
	<i>Seemannshoeft_WGMN</i>	124,9	surface-1m	surface	SSC
<i>Bunthaus_WGMN</i>	143,7	surface-1m	surface	SSC	
Ems 2005 2019	<i>EmdenEmspier</i>	5,9	NHN-4,4m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>Pogum</i>	12,8	NHN-2,7m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>Gandersum</i>	16,3	surface-1m	surface	SAL,TEMP
			NHN-2,6m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>Terborg</i>	23,8	NHN-3,5m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>Leerort</i>	33,5	NHN-3,0m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>Weener</i>	41,2	NHN-3,0m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>Papenburg</i>	47,5	surface-0,5m	surface	SSC
			NHN-2,4m	fond	SSC, SAL,TEMP
	<i>Herbrum</i>	60,7	N/A	fond	SAL,TEMP
Weser 2017 2018 2019	<i>DWG</i>	34,1	NHN-2,7m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>RSS</i>	46,8	NHN-2,9m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>BAL</i>	60,1	NHN-2,9m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>BLX</i>	64,3	NHN-2,8m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>NUF</i>	70,8	NHN-2,7m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>RFL</i>	80,1	NHN-3,0m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>BRA</i>	87,3	NHN-2,8m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>EFL</i>	93,3	NHN-2,6m	fond	SSC,SAL,TEMP

Tableau 7. Noms, distances à l'embouchure, profondeur de mesure et paramètres mesurés des stations hydrologiques des estuaires de la Seine, la Loire et la Gironde.

	station	x (km)	profondeur	niveau	paramètres
Seine 2016 2017	<i>baliseA</i>	19,8	fond+1m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>fatouville</i>	38,3	surface-1m	surface	SSC, SAL ²⁰¹⁷
			fond+1m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>tancarville</i>	48,0	surface-1m	surface	SSC, SAL ²⁰¹⁷
			fond+1m	fond	SSC,SAL,TEMP
	<i>VDL</i>	119,3	surface-1m	surface	SSC
	<i>rouen</i>	143,7	surface-1m	surface	SSC
Loire 2015 2016 2017 2018	<i>donges</i>	33,6	surface-1m	surface	SSC,SAL,TEMP
	<i>paimboeuf</i>	38,4	surface-1m	surface	SSC,SAL,TEMP
	<i>cordemais</i>	49,5	surface-1m	surface	SSC,TEMP
	<i>lePellerin</i>	61,7	surface-1m	surface	SSC,SAL,TEMP
	<i>trentemoult</i>	75,9	surface-1m	surface	SSC,SAL,TEMP
	<i>bellevue</i>	85,4	surface-1m	surface	SSC,SAL,TEMP
Gironde 2015 2016	<i>Pauillac²⁰¹⁵</i>	79,2	surface-1m	surface	SSC,SAL,TEMP
	<i>Bordeaux</i>	122,3	surface-1m	surface	SSC,SAL,TEMP

Tableau 8. Paramètres des fichiers *thalweg_measurements*.

		Elbe	Ems	Weser	Seine	Loire	Gironde		
		2012 2013 2014 2015	2005 2017 2018	2017 2018 2019	2016 2017	2015 2016 2017 2018	2015 2016		
	variables	description							
elev_thalweg	par marée	<i>id_LW1</i>	indices temporels des marées basses (début)						
		<i>id_LW2</i>	indices temporels de marées basses (fin)						
		<i>id_HW</i>	indices temporels de marées hautes						
		<i>TR</i>	marnage						
		<i>flood</i>	durée de flot						
		<i>ebb</i>	durée de jusant						
		<i>XE</i>	élévation de surface						
	<i>H</i>	profondeur totale							
hydro_thalweg	par marée	<i>id_[LW1, LW2, HW]</i>	indices des marées [<i>basses début, basses fin, hautes</i>]						
		<i>Qt</i>	debit à marées hautes						
		<i>SALb_tavg</i>	salinité moyenne par marée au fond						
		<i>SALs_tavg</i>	salinité moyenne par marée en surface						
		<i>SSCb_tavg</i>	SSC moyenne par marée au fond						
		<i>SSCs_tavg</i>	SSC moyenne par marée en surface						
		<i>SSCb_tmax</i>	SSC maximale par marée au fond						
		<i>SSCs_tmax</i>	SSC maximale par marée en surface						
		<i>TEMPb_tavg</i>	température moyenne par marée au fond						
		<i>TEMPs_tavg</i>	salinité moyenne par marée en surface						
			<i>SAL_bottom</i>	salinité au fond					
			<i>SAL_surface</i>	salinité en surface					
			<i>SSC_bottom</i>	SSC au fond					
			<i>SSC_surface</i>	SSC en surface					
			<i>TEMP_bottom</i>	température au fond					
			<i>TEMP_surface</i>	température en surface					
			<i>Q</i>	débit					

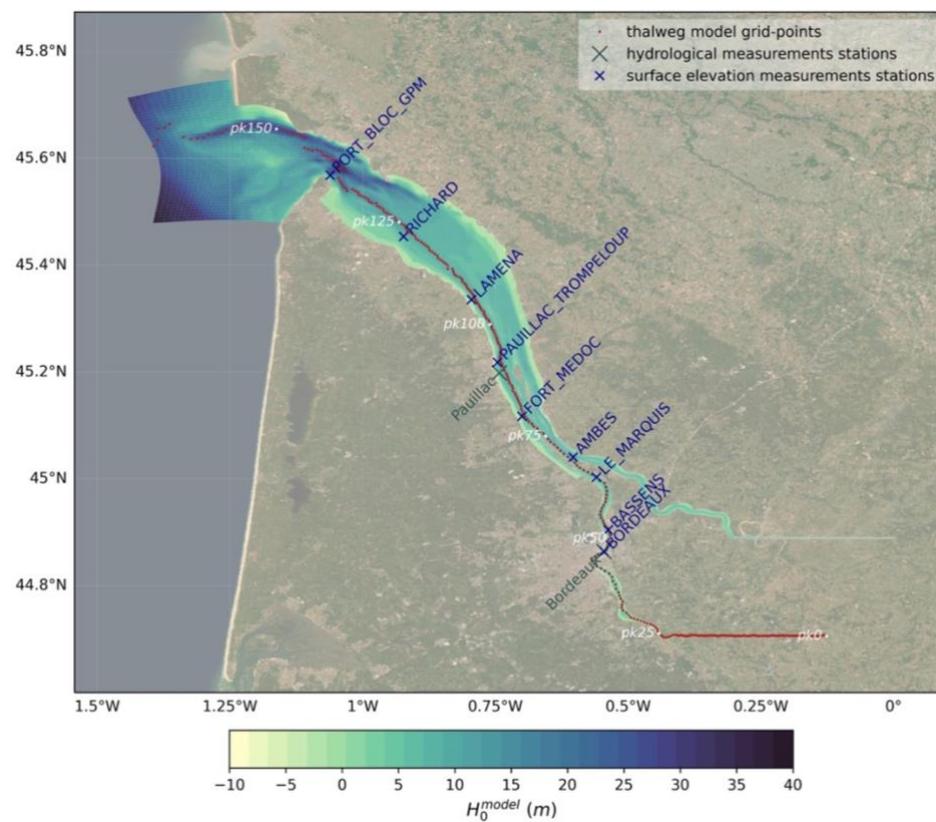


Figure 31. Bathymétrie et grille de calcul du modèle, et position des points du thalweg, et des stations de mesures (hydrologiques et d'élévation de surface) pour l'estuaire de la Gironde.

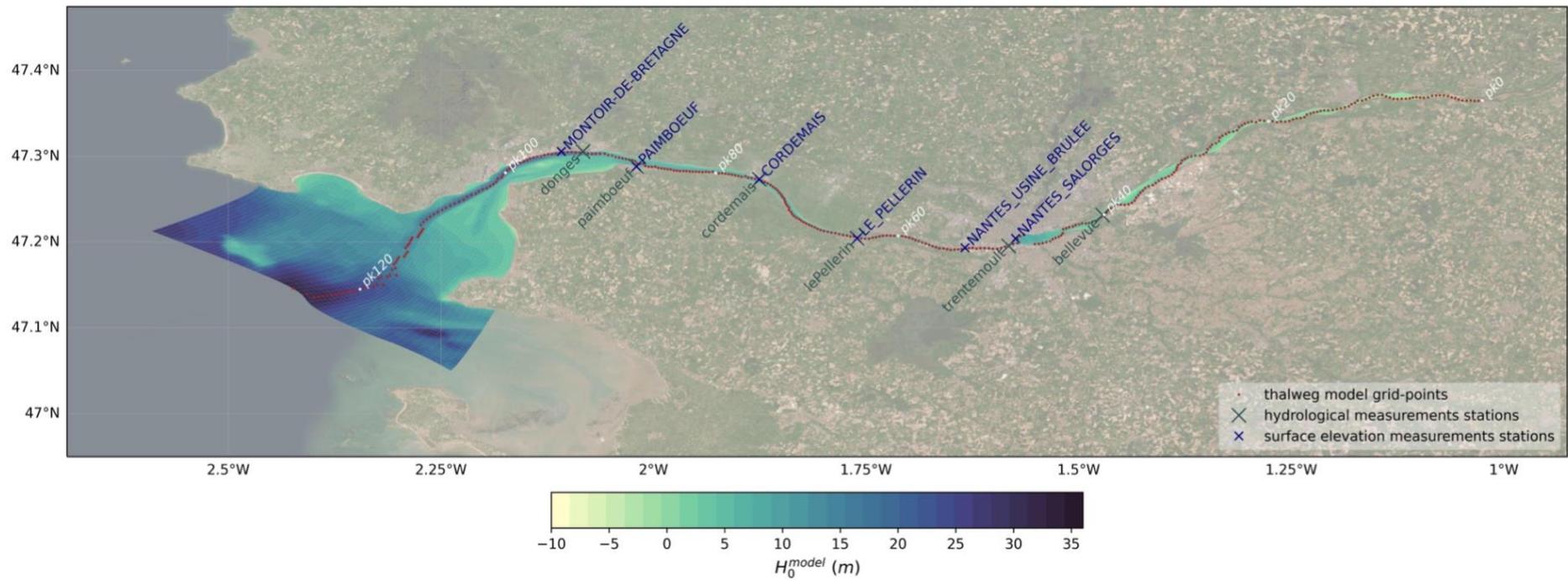


Figure 32. Bathymétrie et grille de calcul du modèle, et position des points du thalweg, et des stations de mesures (hydrologiques et d'élévation de surface) pour l'estuaire de la Loire.

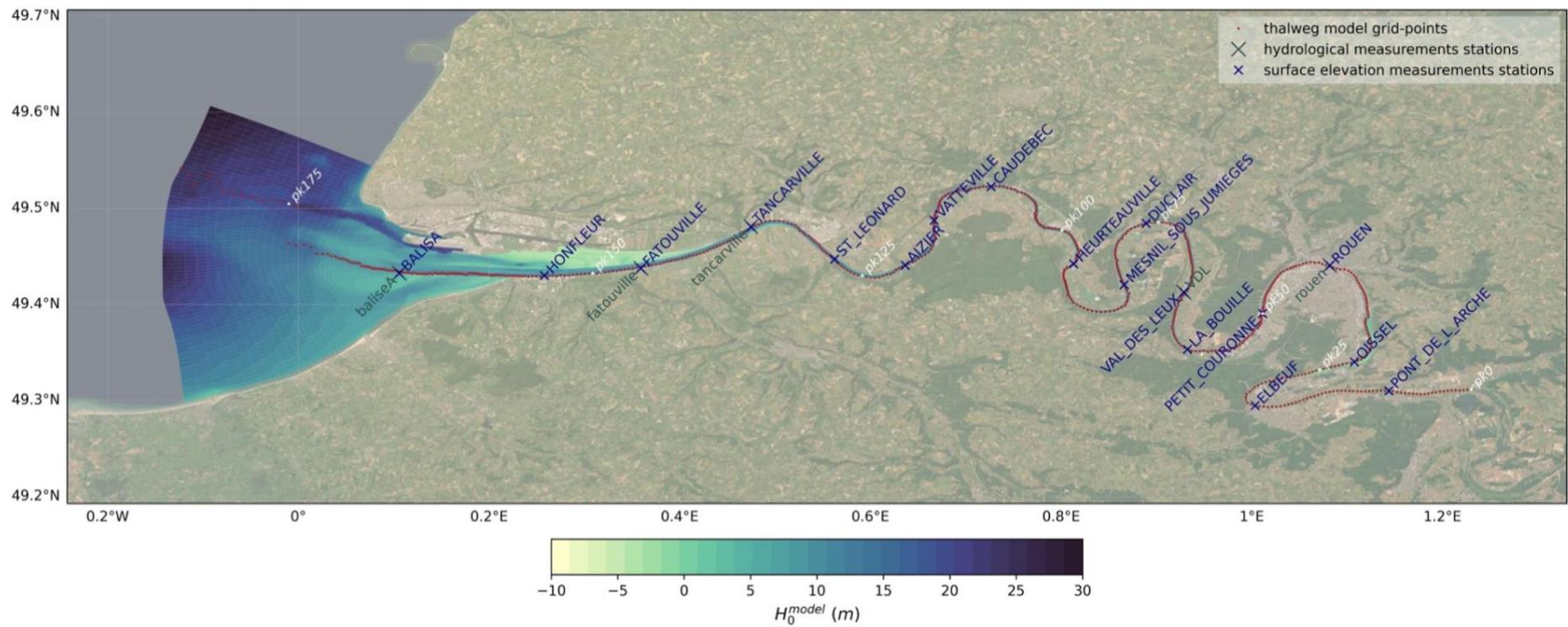


Figure 33. Bathymétrie et grille de calcul du modèle, et position des points du thalweg, et des stations de mesures (hydrologiques et d'élévation de surface) pour l'estuaire de la Seine.

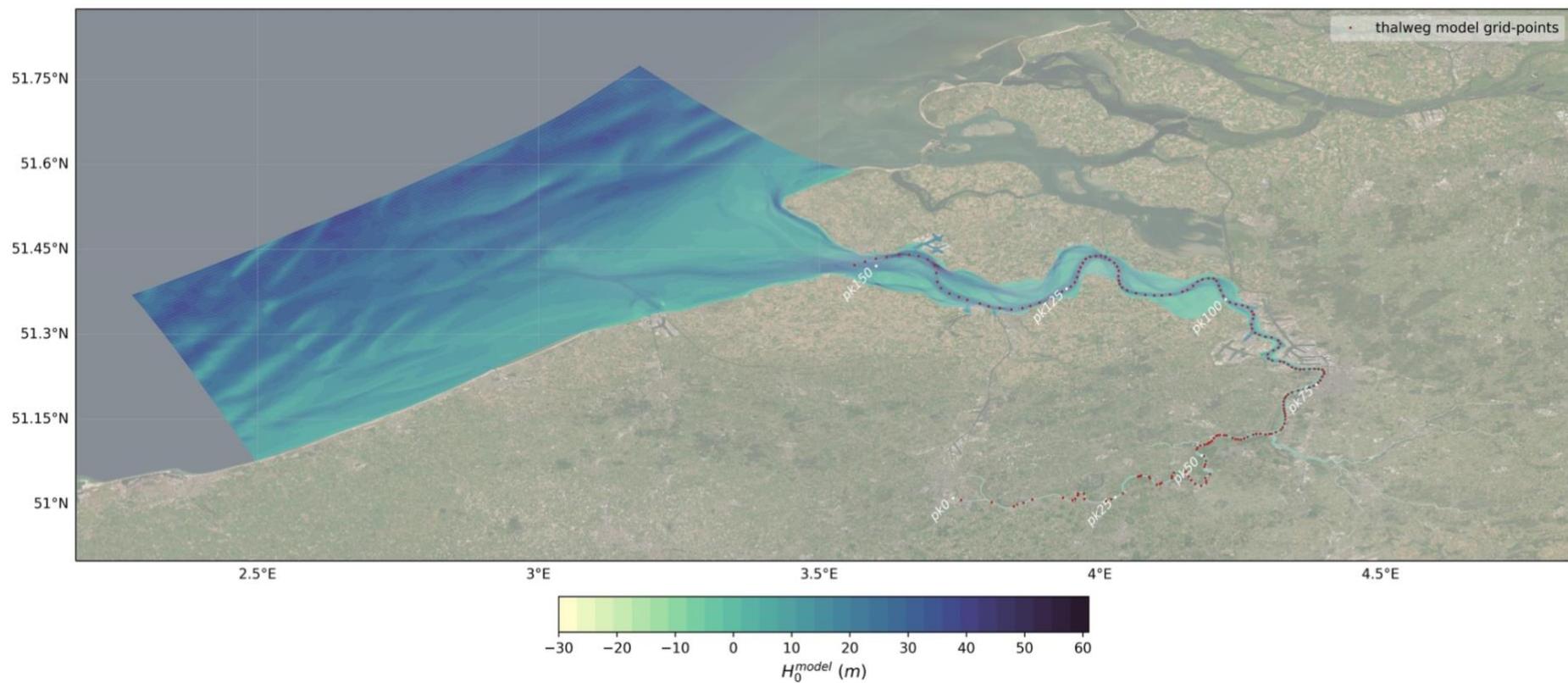


Figure 34. Bathymétrie et grille de calcul du modèle, et position des points du thalweg pour l'estuaire de l'Escaut.

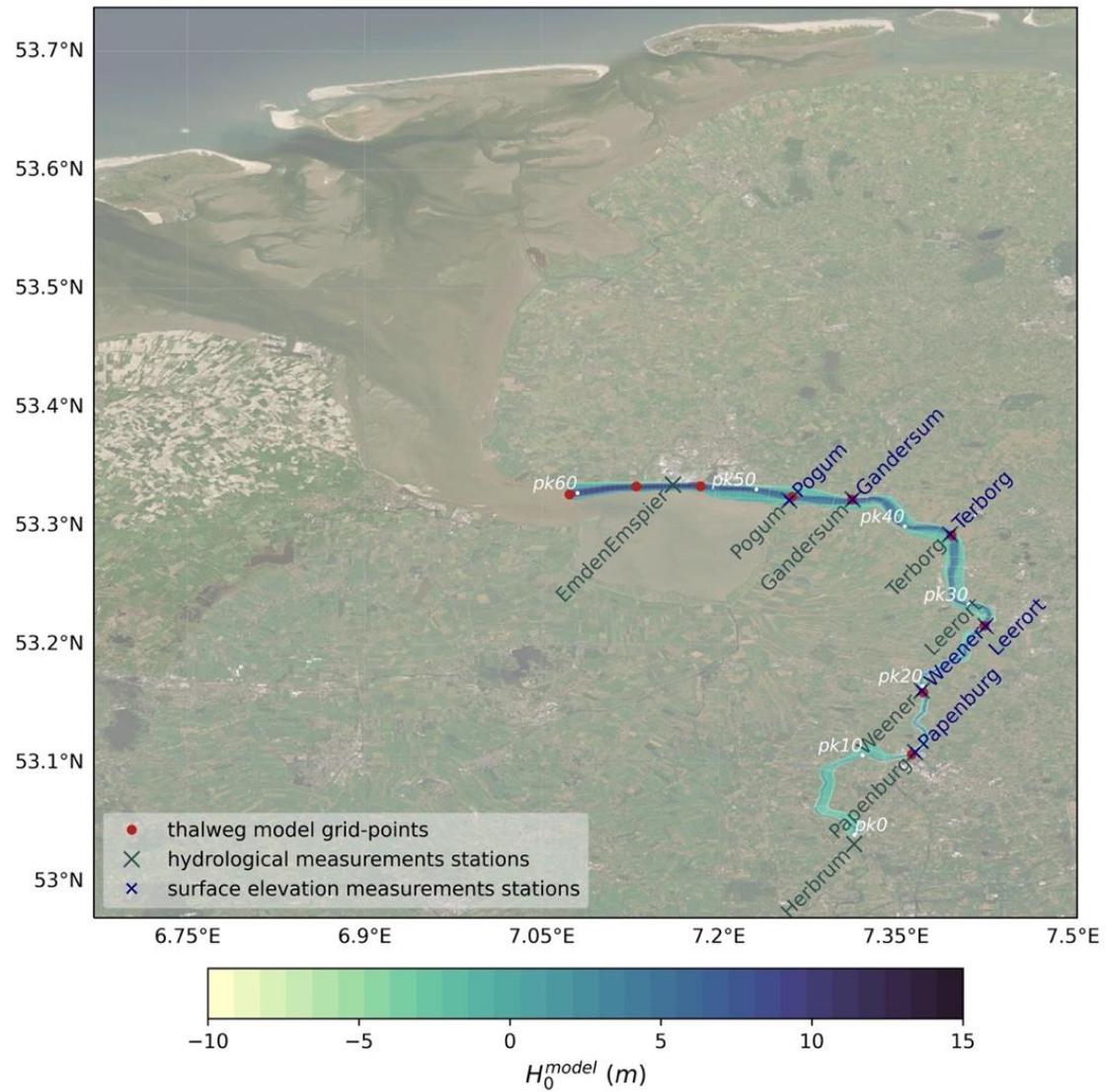


Figure 35. Bathymétrie et grille de calcul du modèle, et position des points du thalweg et des stations de mesures (hydrologiques et d'élévation de surface) pour l'estuaire de l'Ems.

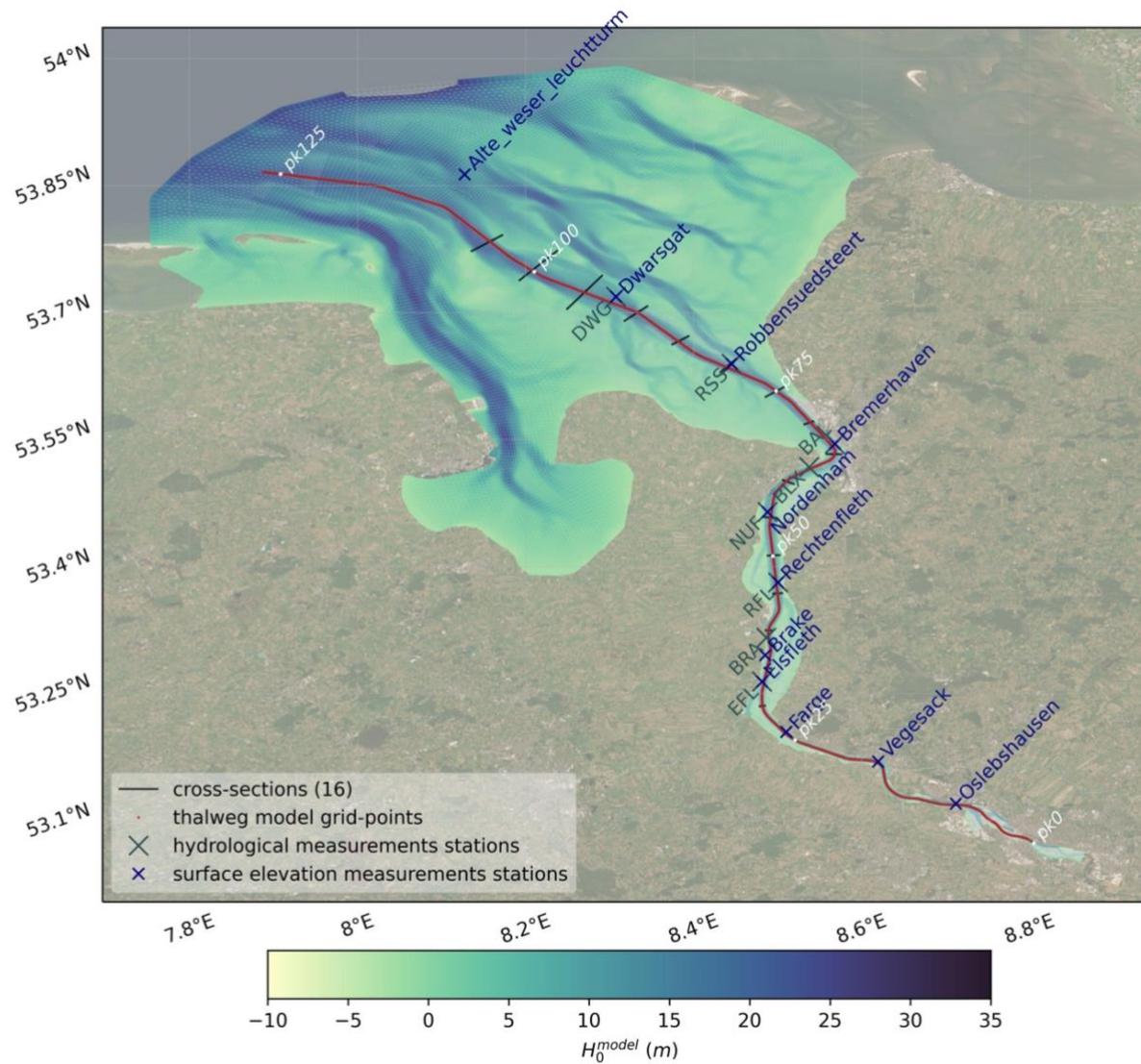


Figure 36. Bathymétrie et grille de calcul du modèle, et position des points du thalweg, des sections orthogonales et des stations de mesures (hydrologiques et d'élévation de surface) pour l'estuaire de la Weser.

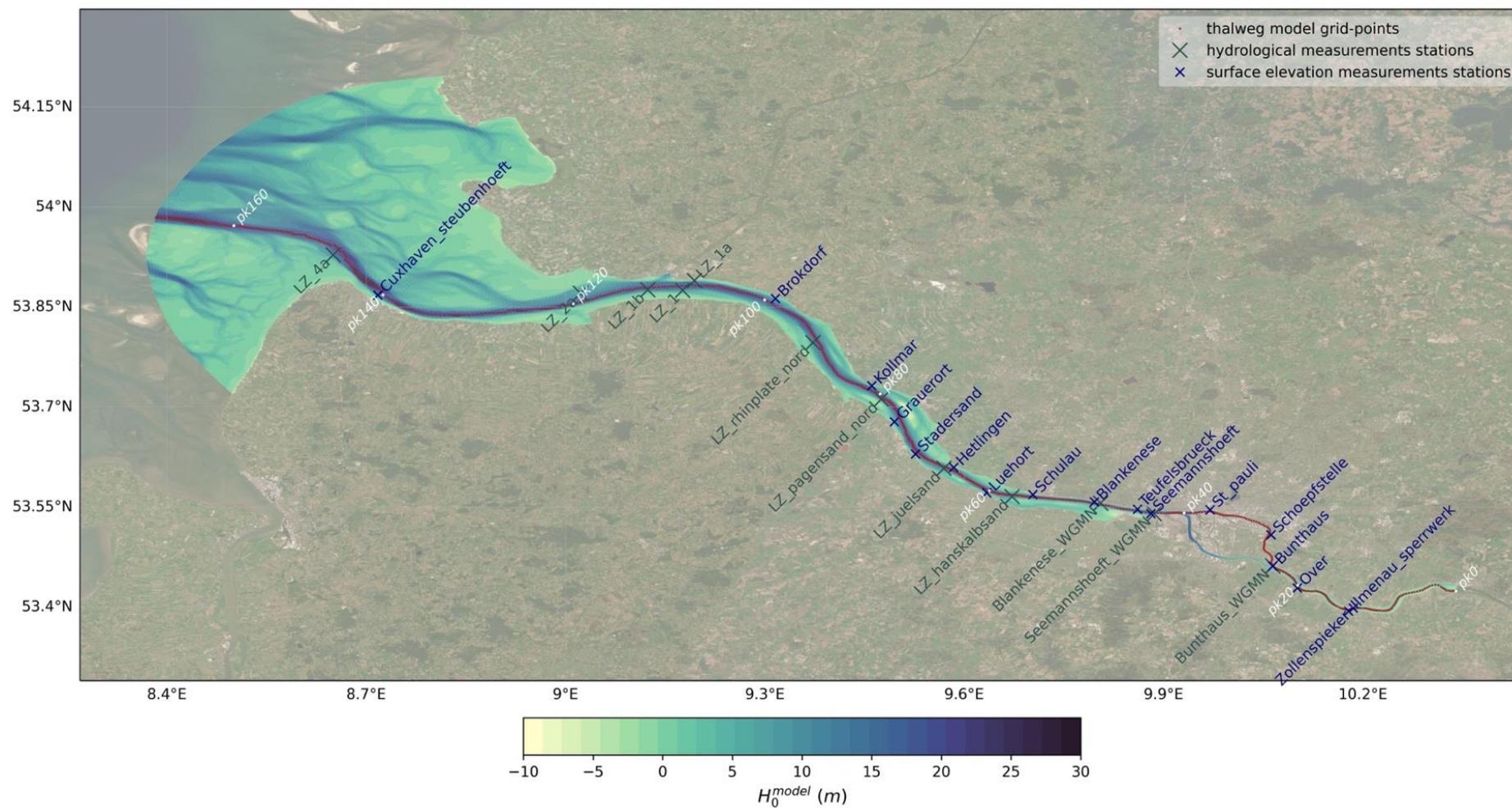


Figure 37. Bathymétrie et grille de calcul du modèle, et position des points du thalweg, et des stations de mesures (hydrologiques et d'élévation de surface) pour l'estuaire de l'Elbe.

