



# MEANDRES

Modélisation de l'Effet des déplacements  
anthropiques de sédiments sur l'estuaire  
de la Seine

Septembre 2016

Jean Philippe Lemoine

## RESUME ET MOTS-CLES

Le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire (HMS) d'un estuaire dragué pour les besoins de la navigation peut se révéler très sensible au déplacement des masses sédimentaires liées aux opérations de dragage et au dépôt de matériaux dragués. D'une part ces interventions génèrent des flux s'ajoutant aux flux naturels liés aux courants et aux vagues, mais surtout elles entraînent une modification morphologique susceptible d'impacter en retour les courants et transports sédimentaires. Selon l'emplacement des rejets de dragage, une part des sédiments dragués est susceptible de revenir dans l'estuaire, voire dans le secteur dragué, et ainsi influencer le volume des dragages d'entretien. Plus généralement, les opérations de dragages influencent le bilan sédimentaire. Dans le cas de la Seine, les 6 millions de m<sup>3</sup> dragués sont supérieurs à l'estimation des apports naturels de sédiment à l'estuaire, d'origine marine ou fluviale.

En s'appuyant sur un modèle hydro-sédimentaire déjà validé dans le cadre du Programme Scientifique Seine-Aval, le projet Seine-Aval 6 MEANDRES a pour objet d'étudier l'effet des transferts anthropiques de sédiments sur le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Après une phase de validation de la nature des sédiments et des quantités draguées, les facteurs de forçages météo-océaniques à l'origine des dépôts de sédiments à draguer seront analysés. Par une technique de marquage numérique des particules, un suivi spatio-temporel des sédiments dragués puis clapés en mer sera réalisé, afin de caractériser la part de ces matériaux susceptibles de réalimenter le bouchon vaseux et les vasières latérales ou les bancs d'embouchure, ainsi que les temps de transferts associés. L'influence des stratégies de dragage sur l'évolution long terme (20 à 50 ans) de la morphologie de l'estuaire et de la nature de sa couverture sédimentaire sera considérée, selon différents scénarios prospectifs.

**Ce projet s'intègre dans la 6ième phase du programme scientifique Seine-Aval.**

Mots clés : estuaire, dragages, évolution morphosédimentaire, flux sédimentaires, sable/vase, turbidité, modélisation, observation.

## 1 Contexte et problématique scientifique

La morphologie, l'hydrodynamisme et l'environnement sédimentaire d'un estuaire conditionnent son fonctionnement écologique et les usages qui en dépendent. Dans le cas d'un système anthropisé, les équilibres déterminant ce fonctionnement résultent des interactions entre processus naturels et effets des activités humaines. La connaissance de ces interactions, à différentes échelles spatiales et temporelles, est indispensable à l'analyse du fonctionnement global de l'estuaire, de ses composantes physiques jusqu'à l'évaluation de sa productivité totale.

Le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire (HMS) d'un estuaire dragué pour les besoins de la navigation peut se révéler très sensible au déplacement des masses sédimentaires liées aux opérations de dragage et le cas échéant à celles de clapage ou dépôt de matériaux dragués. D'une part, ces interventions génèrent des flux s'ajoutant aux flux naturels liés aux courants et aux vagues, mais surtout elles entraînent une modification morphologique susceptible de modifier le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire, et donc les flux particuliers associés (Palaogianni, 2015 ; Roelvink, 2011; Van Maren, 2015 ; Jeuken et Wang, 2010 ; Monge-Ganuzas, 2013). Selon la pratique de rejet ou non des matériaux dragués dans le système, et selon l'emplacement de ces rejets, une part des sédiments dragués est susceptible d'être redéplacée dans l'estuaire, voire dans le secteur dragué, et ainsi influencer le volume des dragages d'entretien. Plus généralement, les opérations de dragages influencent le bilan sédimentaire local, très souvent mal fermé dans le cas des estuaires compte tenu des grandes incertitudes relatives aux apports marins. En outre, les dragages concernent différents types de matériaux aux comportements distincts : effectivement l'effet sur le bilan sédimentaire peut être différent pour les vases et les sables. Dans certains cas, la nature du sédiment superficiel peut être localement modifiée. Les conséquences environnementales potentielles sont multiples. D'une part les évolutions morphologiques et les variations de nature sédimentaire modifient les habitats benthiques (en particulier dans les zones intertidales proches plus ou moins vaseuses). D'autre part les conditions de turbidité du milieu peuvent être altérées, soit indirectement en fonction des changements de fonctionnement hydrosédimentaire, soit directement dans le cas de relargage de particules fines lors des opérations de dragage. Les variations de turbidité induites par les travaux de dragage (Shukla, 2015) peuvent ainsi avoir des répercussions sur les conditions d'éclairement et donc sur la production primaire (Essink, 2009). Ces effets sur les concentrations en matières en suspension (MES) engendrent à leur tour des évolutions des faciès sédimentaires et donc de la production benthique (Wildish, 1985). Ainsi, les effets directs des dragages sur la morphologie des estuaires ont des répercussions indirectes sur l'ensemble du fonctionnement écologique estuarien et sur sa productivité (Rhoads, 1978).

Dans le cas de l'estuaire de la Seine, l'embouchure est le lieu d'une dynamique sédimentaire intense se traduisant par une évolution morphologique spectaculaire depuis plusieurs décennies. Dans ce même secteur, des dragages sont opérés à la fois dans le port du Havre et ses accès maritimes, et dans le chenal de navigation de la Seine, qui donne accès au port de Rouen. Le bilan sédimentaire montre que les travaux de dragages déplacent annuellement une masse de sédiments du même ordre de grandeur que la masse de sédiment entrant naturellement dans l'estuaire (Lemoine & Verney, 2015), et bien supérieure à la fraction apportée par le fleuve en amont. Ces 6 millions de m<sup>3</sup> annuellement dragués sont également comparables aux déplacements sédimentaires moyens annuels observés sur la dernière décennie au niveau de l'embouchure de l'estuaire, obtenus en sommant les sédiments accumulés dans certains secteurs ou érodés dans d'autres (Artelia, 2012). Il est donc naturel de s'interroger sur les conséquences de la gestion anthropique des sédiments dans la dynamique des particules et le bilan sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Par exemple, la question d'une dépendance éventuelle de la masse du bouchon vaseux en fonction des opérations de dragage et des conditions de rejet dans le système fait aujourd'hui débat dans la communauté. La connaissance des impacts de ce forçage reste encore limitée, car la majeure partie des études du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine a considéré uniquement les forçages hydrométéorologiques naturels (marées, débits de la Seine à Poses, conditions météo-océaniques). Cependant, les opérations de dragage ont pu récemment être introduites dans les modèles numériques de transport sédimentaire (Waeles et Le Hir, 2006 ; Artelia, 2014), ouvrant une voie d'investigation possible sur le lien entre dragages, flux et bilans sédimentaires et même évolution morphosédimentaire de l'estuaire. Cette problématique s'inscrit en totale adéquation avec l'axe 1 de l'appel à projet Seine-Aval 6 visant à étudier les interactions entre les forçages anthropiques et le fonctionnement naturel de l'estuaire.

## 2 Objectifs du projet

L'objectif du projet est d'étudier l'effet des transferts anthropiques de sédiments sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine, et sur ses tendances évolutives en tenant compte des couplages hydro-morpho-sédimentaires. Cette analyse devrait permettre ultérieurement l'étude de ces effets sur le fonctionnement écologique de l'estuaire, en terme d'évolution d'habitats notamment.

## 3 Approche méthodologique et structuration du travail

Pour étudier ces interactions, l'outil de modélisation HMS développé par l'Ifremer dans le cadre du programme Seine-Aval (Lazure et Dumas, 2008 ; Le Hir et al., 2011 ; Kervella et al., 2012 ; Grasso et al., 2012 ; Grasso et al., 2015) sera mobilisé et sera la base de l'approche méthodologique du projet. Ce modèle a fait l'objet de validations par comparaison avec un ensemble d'observations hydrologiques (salinité) et sédimentologiques (concentration en MES). Ce modèle basé sur les processus résout l'hydrodynamique 3D à surface libre sous hypothèse hydrostatique, et les transports de sédiments (sables et vases) en suspension ainsi que leur consolidation. La bathymétrie, donnée d'entrée de ce modèle,

est régulièrement mise à jour pour rendre compte des liens entre morphologie et hydrodynamisme. Le domaine d'étude recouvre la baie de Seine de Cherbourg à Fécamp, et l'estuaire de Seine jusqu'au barrage de Poses, mais l'attention sera focalisée sur le secteur dynamique de l'embouchure (figure).



Localisation du site d'intérêt

Les étapes du travail envisagé sont succinctement décrites ci-après et synthétisées dans le planning suivant.

**Tâche 1a :** Inventaire bibliographique et assemblage des données disponibles

Il s'agit de rechercher des références sur les liens établis entre dragages et flux/bilans sédimentaires en estuaire, et de les analyser.

**Tâche 1b :** Assemblage des données de dragage du GPM de Rouen et du GPM du Havre, et reconstitution de l'historique des dragages, en distinguant sables et vases ; analyse de cet historique en lien avec les aménagements successifs, et éventuellement détection de cyclicités, en lien avec des oscillations climatiques.

**Tâche 2 :** Simulation des dragages dans la modélisation hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine, estimation simultanée des volumes et des masses draguées. Validation des résultats concernant la localisation dans l'espace et dans le temps des prélèvements simulés et la nature des sédiments concernés, par comparaison aux données recueillies dans la tâche 1b. Analyse de ces résultats et établissement du lien avec les forçages dominants (tempête, régime de vent, régime fluvial, amplitude de marée).

**Tâche 3 :** Marquage numérique de différents stocks ou apports de sédiment, dont les matériaux clapés issus du port du Havre et de ses accès, et ceux issus du chenal de navigation de la Seine, mais aussi les particules venant du large ou encore celles apportées par la Seine en amont. Ce marquage permettra un suivi spatiotemporel de ces différents

stocks de sédiments et l'identification de la part des matériaux dragués dans les matières en suspension du bouchon vaseux ou déposée en surface dans les vasières et bancs d'embouchure, ou même sur les schorres. Cela permettra de caractériser le "poids" des dragages dans le bilan sédimentaire de l'estuaire aval de la Seine. Une analyse des temps de transferts sera aussi conduite. S'appuyant sur ces analyses, des indicateurs seront recherchés, dans le but de comparer différents scénarios alternatifs de transferts sédimentaires anthropiques.

**Tâche 4 :** Simulation de scénarios théoriques de stratégies de dragage, volontairement excessifs par rapport à la situation actuelle, principalement :

- absence d'entretien du chenal de navigation de la Seine, accompagnée ou non de l'absence de dragages d'entretien du port du Havre et de ses accès ;
- solutions alternatives de rejets de dragages (aucun rejet en mer, rejet en un site alternatif favorisant la dispersion, rejet en un site alternatif favorisant le piégeage des sédiments) ;
- stratégies alternatives des périodes d'entretien, avec possibilité d'anticipation, en exploitant le caractère saisonnier des dépôts ;

Cette démarche ne se veut pas opérationnelle, et ne relève donc pas de l'ingénierie : il s'agit de mieux comprendre le déterminisme de la contribution des transferts d'origine anthropique dans le bilan sédimentaire de l'estuaire, et d'imaginer des pistes alternatives.

**Tâche 5 :** Influence des stratégies de dragage sur l'évolution à long terme (20 à 50 ans) de la morphologie de l'estuaire et de la nature de sa couverture sédimentaire, en exploitant la capacité morphodynamique (e.g. Waeles et al., 2008) de la modélisation mise en place, dans la limite de ses incertitudes. À cette fin des scénarios seront comparés :

- scénario tendanciel, en poursuivant la stratégie de dragages d'entretien actuelle (avec clapage des matériaux du chenal de Rouen sur le site de Machu),
- scénario sans aucun dragage,
- 2 scénarios de rejets alternatifs.

Pour tous les scénarios étudiés (tâches 4 et 5), les quantités de sable et de vase à draguer pour maintenir la côte des fonds seront réévaluées.

**Tâche 6 :** Valorisation des résultats, finalisation du manuscrit de thèse, préparation de la soutenance et échanges avec les acteurs opérationnels et scientifiques. Des interactions fortes entre ce projet et le programme de recherche Seine-Aval 6 sont attendues : celles-ci nécessiteront des échanges réguliers avec les porteurs de projet Seine-Aval 6, et une restitution lors des colloques annuels Seine-Aval.

A priori, les tâches 2, 3, 4 et 5 pourront donner lieu chacune à une publication, ces publications constitueront l'essentiel du manuscrit de thèse.



## 4 Echancier

tâches		2016			2017												2018												2019											
		9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8			
1	Inventaire bibliographique et historique des dragages																																							
2	Simulation des dragages et analyse des résultats																																							
3	Marquages des stocks sédimentaires,																																							
4	Simulation de scénarios alternatifs de dragage																																							
5	Simulation des évolutions morphodynamiques selon différents scénarios																																							
6	Valorisation (soumission de publications, manuscrit)																																							

## 5 Conditions de réalisation du projet

Ce projet fait l'objet d'une thèse qui sera préparée par Jean-Philippe Lemoine, salarié du GIP Seine-Aval. Elle se déroulera principalement dans les locaux du GIP Seine-Aval, avec des séjours réguliers (de l'ordre de 1 semaine par trimestre) dans le laboratoire DYNECO/DHYSED de l'Ifremer à Brest.

## 6 Collaborations

Ce projet est aussi l'occasion de poursuivre les collaborations entre l'UMR 6143 M2C Morphodynamique Continentale et Côtière des universités de Rouen et Caen, les Grands Ports Maritimes de Rouen et du Havre et le GIP Seine Aval.

## BIBLIOGRAPHIE

ARTELIA, 2012. **Expertise sur la fosse nord de l'estuaire de la Seine - Synthèse Finale - Rapport 171 1900 R9**. Rapport pour le compte du Grand Port Maritime du Havre, 33(0), p.88.

ARTELIA, 2014. **Rehabilitation des vasières de l'estuaire de la Seine - Développement d'un modèle hydrosédimentaire 3D de l'estuaire - Construction, calage et validation du modèle hydrosédimentaire**. Rapport pour le compte du Grand Port Maritime du Havre, 33(0), p.196.

Essink, K., 1999. **Ecological effects of dumping of dredged sediments; options for management**. Journal of Coastal Conservation, 5(1), pp.69–80.

Grasso, F., Le Hir, P. & Bassoulet, P., 2012. **Modélisation validée de l'hydro-morpho-sédimentologie base physique d'une modélisation environnementale de l'estuaire de la Seine - Rapport final**. Rapport complémentaire du projet Seine-Aval 4 MODEL, pp.1–62.

Grasso F., Le Hir P., Bassoulet P., 2015. **Numerical modelling of mixed-sediment consolidation**. Ocean Dynamics, 65(4), 607–616.

Jeuken, M.C.J.L. & Wang, Z.B., 2010. **Impact of dredging and dumping on the stability of ebb – flood channel systems**. Coastal Engineering, 57(6), pp.553–566. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.12.004>.

Kervella Y., Khojasteh Pour Fard I., Le Hir P., Renault E., Lemoine J.P., 2012. **Modélisation hydrodynamique tridimensionnelle en coordonnées curvilignes non-orthogonales de l'estuaire de la Seine**. Proc. XII<sup>e</sup> journées Génie Côtier Génie Civil, Cherbourg, 12-14 juin, 89-100.

Lazure, P., and F. Dumas, 2008. **An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)**. Advances in Water Resources, 31, 233-250.

Le Hir, P., A. Ficht, R. Silva Jacinto, P. Lesueur, J.-P. Dupont, R. Lafite, I. Brennon, B. Thouvenin, P. Cugier, 2001. **Fine Sediment Transport and Accumulations at the Mouth of the Seine Estuary (France)**. Estuaries, 24(6B), 950-963.

Le Hir P., F. Cayocca, B. Waeles, 2011. **Dynamics of sand and mud mixtures: a multiprocess-based modelling strategy**. Continental Shelf Research, 31, S135-S149.

Lemoine, J.P. & Verney, R., 2015. **Fonctionnement hydro-sédimentaire de L'estuaire de La Seine**. Fascicule Seine-Aval, p.64.

van Maren, D.S., van Kessel T., Cronin K., Sittoni L., 2015. **The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration**. Continental Shelf Research, 95, pp.1–14. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2014.12.010>.

Monge-ganzuzas, M., Cearreta, A. & Evans, G., 2013. **Ocean & Coastal Management Morphodynamic consequences of dredging and dumping activities along the lower Oka estuary** ( Urdaibai Biosphere Reserve , southeastern Bay of Biscay , Spain ). Ocean and Coastal Management, 77, pp.40–49. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.02.006>.

Nefeli Palaogianni, 2015. **Modelling the impact of large scale sediment dumping on the meso-scale hydro- and morphodynamics in the Western Scheldt**. Master Thesis Deltares, (July), p.109.

Rhoads, D.C., Mccall, P.L. & Yingsts, J.Y., 1978. **Disturbance and Production on the Estuarine Seafloor**. American Scientist, 66(5), pp.577–586.



- Roelvink, D., 2011. **Sediment relocation and river engineering measures of the River Engineering and Sediment Management Concept ( RESMC ) from the perspective of effectiveness and economic efficiency**. Expert assessment report Dano Roelvink. UNESCO IHE Report.
- Shukla, V.K., Konkane, V.D. & Nagendra, T., Agrawal, J.D., 2015. **Dredged Material Dumping Site Selection Using Mathematical Models**. Procedia Eng. 116, 809–817.  
doi:10.1016/j.proeng.2015.08.368
- Wildish, D.J. & Thomas, M.L.H., 1985. **Effects of dredging and dumping on benthos of Saint John Harbour**, Canada. Marine Environmental Research, 15(1), pp.45–57.
- Waeles B., Le Hir P., 2006. **Simulation des activités de dragage et de leur impact sédimentaire à l'aide d'une modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine**. Proc. IXèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, Brest, Centre Français du Littoral/CETMEF/UBO Ed., 471-481.
- Waeles B., P. Le Hir, P. Lesueur, 2008. **A 3D morphodynamic process-based modelling of a mixed sand/mud coastal environment: the Seine estuary**, France. In Sediment and Ecohydraulics: INTERCOH 2005, Kusuda, Yamanishi, Spearman and Gailani (Eds), Elsevier, Proc. in Marine Science, 9, 477-498.

**POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL**

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

**CONTACT**

Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval

Pôle Régional des Savoirs

115, Boulevard de l'Europe

76100 ROUEN

**Tél : 02 35 08 37 64**

[gipsa@seine-aval.fr](mailto:gipsa@seine-aval.fr)

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

Lemoine JP., 2016. **MEANDRES : Modélisation de l'Effet des déplacements aNthropiques de sédiments sur l'estuaiRE de la Seine.** Projet Seine-Aval 6, 9p.

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

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

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

