



CRONSTIBATH

*Construction de scénarios d'évolution théorique
des bathymétries de l'estuaire de la Seine*

Olivier M. G., L'Ebrellec E.



RESUME EXECUTIF

Avec le dérèglement climatique et l'augmentation des risques de submersion, il est essentiel pour les gestionnaires de disposer d'informations sur les évolutions potentielles du fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire dans le futur. L'hydrodynamique estuarienne est dépendante des forçages hydrométéorologiques amont (e.g. débit de la Seine) et aval (e.g. marée, vague), mais également d'autres paramètres tels que la **morphologie du fond**, le **niveau moyen de la mer** et les aménagements anthropiques. Le projet CRONSTIBATH s'intéresse aux **potentielles évolutions topo-bathymétriques** (i.e. morphologie du fond et niveau marin moyen) de l'estuaire de Seine à l'**horizon 2100**. Ces topo-bathymétries ont pour premier objectif de servir de base à des simulations hydrodynamiques visant à évaluer l'impact de la morphologie du fond et du niveau marin sur les hauteurs d'eau extrêmes (projet SA7-[ATLANTIS](#) : AdapTation à L'augmentation de L'Aléa submersioN dans l'esTuaire de la Seine). Plusieurs topo-bathymétries, définies à dire d'experts, sont proposées en tenant compte de différents scénarios d'évolution théoriques de la morphologie du fond (e.g. une couche sédimentaire en accrétion ou en érosion) et de l'augmentation du niveau moyen de la mer de 1 m. Les évolutions potentielles des forçages et des apports sédimentaires sont prises en compte uniquement via la définition des scénarios cibles. Ces **scénarios** se veulent très **contrastés** afin d'encadrer un large panel d'évolutions possibles et **comprendre l'impact de l'évolution topo-bathymétrique sur l'hydrodynamique** et les inondations dans l'estuaire. Trois scénarios bathymétriques à l'horizon 2100 sont proposés :

- Scénario « augmentation bathymétrique » : l'embouchure est globalement plus profonde en 2100 qu'en 2022.
- Scénario « réduction bathymétrique » : l'embouchure est globalement moins profonde en 2100 qu'en 2022.
- Scénario « évolution différenciée » : les bancs sédimentaires se maintiennent à une profondeur moyenne équivalente à 2022 en 2100, mais les chenaux s'approfondissent.

REMERCIEMENTS

Le GIP Seine-Aval tient à remercier le groupe d'expert constitué de Florent Grasso, Romaric Verney, Patrice Tournier, Olivier Macur, Albert Gallicher Lavanne, Axel Gilles, Sandric Lesourd, Bernadette Tessier, Nicolas Huybrechts, Vanessya Laborie et Jean-Philippe Lemoine, pour leurs contributions/avis/conseils tout au long de ce projet. Le GIP Seine-Aval remercie HAROPA port et VNF pour les données topo-bathymétriques fournies sans lesquelles cette méthodologie n'aurait pas pu être mise en place. Merci également à Florent Grasso, Vanessya Laborie et Romain Pellen pour leurs réalisations dans les projets SA6-MORPHOSEINE, SA7-ATLANTIS et SA7-PSES, qui ont fourni de précieuses informations et constituent une base de travail primordiale pour la définition des scénarios et leur validation.

SOMMAIRE

Résumé exécutif	2
Remerciements.....	3
Sommaire	4
liste des illustrations et tableaux.....	5
Introduction.....	7
Méthodologie.....	8
I. Hypothèses et choix des scénarios cibles à l’horizon 2100.....	8
1. « Augmentation topo-bathymétrique » (érosion ou maintien de la couche sédimentaire)..	9
2. « Réduction topo-bathymétrique » (accrétion sédimentaire)	9
3. Scénario « évolution différenciée » (érosion dans les chenaux et accrétion sur les bancs)	10
II. Modification de la bathymétrie à l’embouchure	10
III. Modification des zones inter et supratidales bordant l’embouchure (périmètre 2).....	15
IV. Modification de la bathymétrie amont de l’embouchure et jonction avec les scénarios de l’embouchure (périmètre 3)	16
Résultats	18
I. Comparaison des résultats	18
1. Evolutions topo-bathymétriques (périmètres 1 et 2)	19
2. Evolutions des zones inter et supra-tidales de l’embouchure (périmètre 2)	21
3. Evolutions des pentes (périmètres 1 et 2)	22
II. Scénario « augmentation topo-bathymétrique ».....	23
1. Evolution morphologique/topo-bathymétrique	23
2. Critères de validation	24
III. Scénario « réduction topo-bathymétrique »	26
1. Evolution morphologique/topo-bathymétrique	26
2. Critères de validation	27
IV. Scénario « évolution différenciée »	29
1. Evolution morphologique/topo-bathymétrique	29
2. Critères de validation	30
Conclusion	32
Bibliographie.....	33

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET TABLEAUX

Figure 1 : Illustration schématique des scénarios imaginés pour représenter des contextes bathymétriques contrastés. L'évolution morphologique (rouge) est comparée à la montée du niveau marin (bleu). Le signe est positif quand l'accrétion sédimentaire est plus rapide que la montée du niveau marin et inversement. L'évolution bathymétrique (profondeur, double flèche bleu) est quant à elle comparée à la bathymétrie actuelle. Le signe est positif quand le scénario 2100 est plus profond que de nos jours et inversement.	8
Figure 2 : Carte bathymétrique 2022 (source : HAROPA) et délimitation du périmètre d'étude 1.	11
Figure 3 : Evolution morphologique sur la période 2010-2022 (cartes bathymétriques 2022 et 2010, source : HAROPA).	11
Figure 4 : Evolutions morphologiques normalisées sur 1 an, à gauche sur la période 2010-2022 et à droite sur la période 2018-2022.	12
Figure 5 : Evolution en km ² des domaines sub-, supra- et intertidaux depuis 1834 (modifié de Delsinne, 2005) pour la zone de l'estuaire (Pellen et al., 2025).	12
Figure 6 : Méthodologie de modification de la bathymétrie pour représenter les évolutions bathymétriques potentielles à l'horizon 2100 (périmètre 1).	13
Figure 7 : Exemple de modification bathymétrique, scénario évolution différenciée (étapes 3 et 4, Figure 6).	14
Figure 8 : a. Carte bathy-topographique 2022 et délimitation du périmètre 2 (données issues de l'acquisition LIDAR), sur le secteur étudié dans le cadre de CRONSTIBATH. b. Aperçu de l'évolution de la bathy-topographie dans le périmètre 2.	15
Figure 9 : Scénario « augmentation topo-bathymétrique » intégrant tout l'estuaire, la zone d'interpolation entre les périmètres 1 et 3 est représentée par un carré noir.	17
Figure 10 : a. schéma explicatif de l'évolution de la hauteur de la colonne d'eau dans le contexte de montée du niveau marin moyen de 1 m, et b. dans un contexte de montée du niveau marin moyen et d'accrétion sédimentaire égales.	18
Figure 11 : Cartes topo-bathymétriques du secteur de l'embouchure en 2022 (source : HAROPA) et des trois scénarios 2100 générés (niveau marin +1 m pris en compte). Les différences entre les scénarios 2100 et 2022 sont présentées individuellement (parties II. III. et IV. des résultats).	20
Figure 12 : Coupes des évolutions bathymétriques (i.e. de la profondeur, avec le niveau marin + 1 m inclus) des trois scénarios comparés à la bathymétrie en 2022.	21
Figure 13 : Coupes des évolutions topo-bathymétriques à la jonction entre les périmètres 1 et 2 (niveau marin + 1 m inclus) des trois scénarios comparés à la topo-bathymétrie de 2022, dans les fosses Nord et Sud.	22
Figure 14 : Coupes présentant l'inclinaison du terrain des trois scénarios comparés à la situation de 2022.	23
Figure 15 : Evolution morphologique pour le scénario 2100 "augmentation topo-bathymétrique", par rapport à la morphologie de 2022. Le cadre noir représente l'emprise des calculs de volumes réalisés dans le projet PSES (Pellen et al., 2025).	24
Figure 16 : Evolution topo-bathymétrique (niveau marin + 1 m) pour le scénario 2100 "augmentation topo-bathymétrique", par rapport à la topo-bathymétrie de 2022.	24
Figure 17 : Inclinaison du terrain en degrés, en haut en 2022 et en bas, pour le scénario "augmentation topo-bathymétrique".	25
Figure 18 : Evolution morphologique pour le scénario 2100 "réduction topo-bathymétrique", par rapport à la morphologie de 2022.	27

Figure 19 : Evolution topo-bathymétrique (niveau marin + 1 m) pour le scénario 2100 "réduction topo-bathymétrique", par rapport à la topo-bathymétrie de 2022.....	27
Figure 20 : Inclinaison du terrain en degrés pour le scénario "réduction topo-bathymétrique".....	28
Figure 21 : Evolution morphologique pour le scénario 2100 "évolution différenciée", par rapport à la morphologie de 2022.	29
Figure 22 : Evolution topo-bathymétrique (niveau marin + 1 m) pour le scénario 2100 "évolution différenciée", par rapport à la topo-bathymétrie de 2022.....	30
Figure 23 : Inclinaison du terrain en degrés pour le scénario "évolution différenciée".....	31

Tableau 1 : Comparaison des profondeurs moyennes entre le scénario 2100 "augmentation topo-bathymétrique" et 2022, pour chaque secteur bathymétrique de l'embouchure (polygones définis Figure 6).....	25
Tableau 2 : Volume sédimentaire déposé ou érodé entre 2022 et 2100 et taux de sédimentation annuel associé pour le scénario "augmentation topo-bathymétrique". Le calcul a été effectué sur le périmètre 1 et sur l'ensemble du domaine modifié (zone ouest exclue dans les deux cas, Figure 6).	26
Tableau 3 : Comparaison des profondeurs moyennes entre le scénario 2100 "réduction topo-bathymétrique" et 2022, pour chaque secteur bathymétrique de l'embouchure (polygones définis Figure 6).....	28
Tableau 4 : Volume sédimentaire déposé ou érodé entre 2022 et 2100 et taux de sédimentation annuel associé pour le scénario "réduction topo-bathymétrique". Le calcul a été effectué sur le périmètre 1 et sur l'ensemble du domaine modifié (zone ouest exclue dans les deux cas).	29
Tableau 5 : Comparaison des profondeurs moyennes entre le scénario 2100 "évolution différenciée" et 2022, pour chaque secteur bathymétrique de l'embouchure (polygones définis Figure 6).	30
Tableau 6 : Volume sédimentaire déposé ou érodé entre 2022 et 2100 et taux de sédimentation annuel associé pour le scénario "évolution différenciée". Le calcul a été effectué sur le périmètre 1 et sur l'ensemble du domaine modifié (zone ouest exclue dans les deux cas).	31

INTRODUCTION

Situés à l'interface entre terre et mer, les estuaires sont soumis à des régimes hydrodynamiques intenses qui sont la résultante d'une grande variété de forçages, principalement hydrométéorologiques (e.g. marée, vague, débit...). Cependant, l'hydrodynamique est également influencée par d'autres paramètres que les forçages hydrométéorologiques tels que : les aménagements, le niveau marin et la morphologie du fond elle-même. Les interactions entre ces différents paramètres vont contraindre l'estuaire à des évolutions morphologiques journalières, saisonnières, interannuelles et long-termes. L'ensemble rendant les trajectoires d'évolution Hydro-Morpho-Sédimentaire (HMS) long-termes des estuaires particulièrement difficiles à appréhender, car cela demande de prendre en compte une multitude de processus agissant à différentes échelles temporelles (quelques secondes à plusieurs années) et leurs évolutions potentielles.

Les modèles numériques HMS de type « *process based model* » permettent de simuler des évolutions des fonds sédimentaires (composition, et morphologie) en fonction de scénarios d'évolution du contexte hydro-morpho-sédimentaire à moyen/long terme. Cependant, la mise en œuvre de ces outils pour effectuer des simulations prospectives est relativement chronophage et coûteuse, avec des erreurs potentielles relatives aux durées des simulations et aux incertitudes inhérentes aux évolutions des forçages dans le futur.

En complément du développement de ces outils, le projet CRONSTIBATH vise à élaborer, sur la base d'avis d'experts, des scénarios théoriques de topo-bathymétries futures (morphologie du fond et niveau marin moyen), afin de fournir un cadre de référence aux modélisations hydrodynamiques (projet SA7-ATLANTIS). Ce travail permettra dès maintenant de contribuer aux études et recherches sur les trajectoires possibles d'évolution du fonctionnement environnemental de l'estuaire (e.g. dynamique des inondations, migration du gradient de salinité). Il permettra en d'autres termes, d'explorer la sensibilité de l'hydrodynamique de l'estuaire de Seine à l'évolution du niveau marin et de la morphologie du fond. Ces définitions d'évolutions théoriques de la bathymétrie à échéance 2100, se basent sur :

- l'évolution théorique long-terme des estuaires
- la forme actuelle des fonds
- les évolutions morphologiques observées dans les données historiques (1834-2022)
- la nature et de l'épaisseur des sédiments des fonds de l'estuaire
- l'hydrodynamisme actuel de l'estuaire
- les trajectoires d'évolution potentielles des forçages naturels

Dans l'objectif d'effectuer des modifications cohérentes avec les connaissances de l'évolution morphologique long-terme des estuaires, et en particulier de l'estuaire de la Seine, un groupe d'expert a été formé. Il était constitué de sédimentologues, de spécialistes en modélisation hydrodynamique « *process based* », de spécialistes des modélisations HMS et d'acteurs opérationnels spécialistes de la dynamique sédimentaire de l'estuaire de Seine et son embouchure. Ce groupe de travail a permis d'expertiser les méthodologies de modification bathymétriques mises en place, ainsi que de validation des scénarios et d'orienter les modifications en fonction de leur connaissance de la zone d'étude.

METHODOLOGIE

I. Hypothèses et choix des scénarios cibles à l'horizon 2100

Les scénarios sont définis à dire d'expert et reposent sur des concepts théoriques liés aux apports sédimentaires, à l'espace d'accommodation généré par la montée du niveau marin, à l'évolution générale du régime hydrodynamique et aux tendances d'évolutions observées/modélisées. Ils traduisent respectivement une augmentation, une réduction et une évolution différenciée de la topo-bathymétrie en 2100 par rapport à 2022. Etant donné que le niveau marin sera plus haut en 2100, interprétés en termes d'évolution de la couche sédimentaire, ils correspondent à : 1. un de creusement ou de stabilité de la couche de fond (« augmentation bathymétrique ») ; 2. un scénario d'accrétion sédimentaire (« réduction bathymétrique ») ; 3. un mélangeant ces deux concepts (« évolution différenciée ») (Figure 1). En accord avec l'état des connaissances sur le sujet (Laborie, 2024), et en cohérence avec les études précédentes sur la dynamique des inondations (ARTELIA, 2019 ; ARTELIA, 2022), l'hypothèse d'une élévation du niveau marin de +1 m en 2100 a été retenue. Un nombre limité de scénarios de changement bathymétrique à l'horizon 2100 (résultante de l'évolution des fonds et du niveau marin) est retenue, étant donné le temps nécessaire pour explorer leurs conséquences sur l'hydrodynamique avec les modèles numériques (projet SA7-ATLANTIS). Dans le but de connaître la sensibilité de l'hydrodynamique estuarienne aux changements topo-bathymétriques, les scénarios retenus reposent sur des évolutions contrastées, voire opposées.

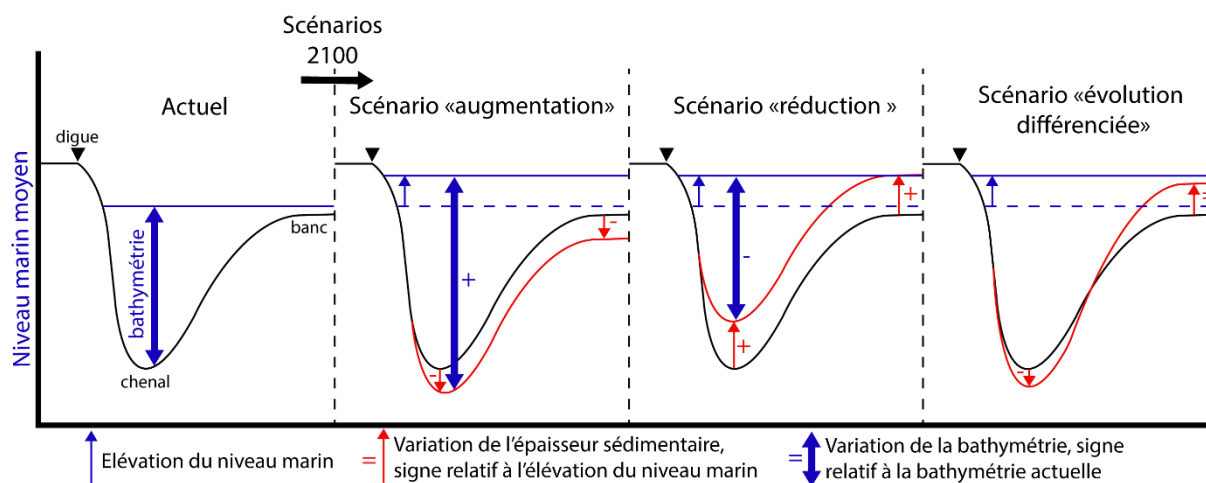


Figure 1 : Illustration schématique des scénarios imaginés pour représenter des contextes bathymétriques contrastés. L'évolution morphologique (rouge) est comparée à la montée du niveau marin (bleu). Le signe est positif quand l'accrétion sédimentaire est plus rapide que la montée du niveau marin et inversement. L'évolution bathymétrique (profondeur, double flèche bleu) est quant à elle comparée à la bathymétrie actuelle. Le signe est positif quand le scénario 2100 est plus profond que de nos jours et inversement.

L'hypothèse est faite de conserver l'aménagement actuel de l'estuaire dans ces scénarios, de manière à se focaliser sur les évolutions induites par la topo-bathymétrie et que les actions anthropiques futurs sont inconnues (e.g. pas de rehaussement des murets anti-inondation dans ces scénarios). Dans le cadre d'ATLANTIS, différents scénarios d'aménagement des berges et du lit majeur seront testés et mis

en cohérence avec les scénarios d'évolution topo-bathymétrique de l'embouchure issus de CRONSTIBATH. Cependant, une attention particulière sera portée à certains aménagements dans ces scénarios, car ils contrôlent la sédimentation actuelle qui sert de base aux modifications bathymétriques. C'est notamment le cas des digues basses de l'embouchure qui stabilisent les bancs sédimentaires dans les fosses Nord et Sud. Les bancs étant adossés à ces ouvrages, il ne semble pas concevable qu'ils dépassent la cote des digues. Un point d'attention particulier sera porté afin que les cotes de ces digues correspondent à la cote maximum potentiellement atteinte par les bancs en 2100.

1. « Augmentation topo-bathymétrique » (érosion ou maintien de la couche sédimentaire)

Le premier scénario, dit « d'augmentation topo-bathymétrique », cherche à générer un contexte dans lequel le système ne parviendrait pas à remplir l'espace supplémentaire engendré par la hausse du niveau marin, voire même éroderait la couche sédimentaire existante. Pour ce scénario, deux options sont possibles, conserver la couche sédimentaire actuelle avec un niveau marin plus haut ou réduire l'épaisseur de la couche sédimentaire. Etant donné le besoin de produire des scénarios contrastés et une potentielle intensification des tempêtes, il a été décidé avec le groupe d'expert de conserver le scénario le plus extrême (i.e. creusement de la couche de fond). Ce qui correspond également aux dernières observations, avec un bilan sédimentaire négatif observé à l'embouchure depuis une trentaine d'année (Lemoine, 2021 ; Pellen et al. 2025). Pour atteindre un bilan sédimentaire négatif entre 2022 et 2100 (dans un contexte de montée du niveau marin), il faudrait une intensification des événements extrêmes générant de l'érosion et des apports sédimentaires limités. A noter que les bilans sédimentaires peuvent être fortement influencés par des interventions anthropiques (e.g. modalité de gestion des dragages d'entretien des chenaux, travaux d'aménagement). Ce scénario permettra d'étudier l'évolution de l'hydrodynamique dans un contexte où l'embouchure de l'estuaire serait globalement plus profonde. Il y aurait donc théoriquement moins de frottement pour atténuer la propagation de la marée à l'embouchure et un volume oscillant plus important. Cette configuration pourrait faciliter la pénétration dans l'estuaire d'aléa d'origine maritime et avoir un impact sur la capacité du système à évacuer les crues engendrées par de forts débits de la Seine.

2. « Réduction topo-bathymétrique » (accrétion sédimentaire)

Le deuxième scénario, dit de « réduction topo-bathymétrique », a pour objectif de construire un contexte dans lequel la profondeur diminue alors que le niveau marin remonte, c'est-à-dire que le remplissage sédimentaire est plus rapide que l'élévation du niveau marin. La construction de ce scénario repose sur l'hypothèse d'apports sédimentaires importants, associés à un régime hydrodynamique moins intense que celui observé actuellement. L'objectif de ce scénario est de tester l'impact d'une embouchure moins profonde qu'à l'actuel. A l'inverse du contexte précédent, le frottement lui augmenterait (théoriquement) à l'embouchure et ce qui réduirait la propagation de la marée dans l'estuaire et donc le volume oscillant. Cette configuration pourrait modifier la propagation d'aléa maritime dans l'estuaire et réduire l'influence des vagues dans certaines zones comme les fosses. La réponse de l'estuaire aux crues engendrées par de forts débits de la Seine serait également différente, avec des temps d'évacuation de la crue différents du contexte actuel (lié à la modification de l'onde de marée dans l'estuaire).

3. Scénario « évolution différenciée » (érosion dans les chenaux et accrétion sur les bancs)

Un troisième scénario a été imaginé à partir des résultats obtenus lors du projet de modélisation morpho-sédimentaire MORPHOSEINE (Grasso et al., 2021). Lors de ce projet, des simulations rétrospectives (1975-1995 et 2009-2018) et prospectives (2016-2066) ont été réalisées. Au niveau de l'embouchure, les résultats des simulations prospectives ont mis en avant une érosion de la couche sédimentaire dans les chenaux (zone endiguée, Fosses Nord et Sud) et une accumulation de sédiments sur les bancs (Amfard, Ratelets, Fosses Nord et Sud). Les dépôts de sédiments sur les bancs sont plus importants pour les simulations prospectives avec une montée du niveau marin plus importante (en présence d'apports sédimentaires suffisants). Cette tendance se traduit par un approfondissement général des chenaux de l'embouchure et une accumulation de sédiments sur les bancs, proportionnelle à la montée du niveau marin. Cette tendance est également observée dans les données bathymétriques acquises par HAROPA (2009-2016 et 2010-2022). En résumé, ce scénario représente donc un contexte de stabilité bathymétrique au niveau des bancs (élévation des bancs égale à la montée du niveau marin) et d'augmentation bathymétrique dans les chenaux. Dans cette configuration, il est extrêmement difficile de formuler des hypothèses sur l'évolution du comportement hydrodynamique de l'estuaire (le maintien à la même profondeur des bancs est-il suffisant pour réduire la remontée des gradients marins dans l'estuaire ? ou au contraire l'augmentation des pentes entre bancs et chenaux va permettre de faciliter cette remontée en canalisant l'onde de marée dans l'embouchure en direction de l'estuaire ?).

II. Modification de la bathymétrie à l'embouchure

Le passage de 2022 à 2100 est défini par les hypothèses des scénarios cibles [Figure 1], qui prennent indirectement en compte des trajectoires d'évolution générale des forçages et des apports sédimentaires. L'objectif est donc de parvenir à reproduire la théorie de ces scénarios tout en considérant la carte bathymétrique actuelle et les tendances récentes d'évolution. La méthodologie repose sur la bathymétrie de 2022 [Figure 2] à laquelle est ajoutée une tendance d'évolution (ou taux de sédimentation) définie à dire d'expert. Les modifications sont donc réalisées « manuellement » pour atteindre les configurations visées [Figure 1], sans recours à une modélisation numérique visant à reproduire les processus hydro-morpho-sédimentaires. Pour objectiver les hypothèses de modification de ces taux de sédimentation, le différentiel bathymétrique 2022-2010 [Figure 3] constitue la base de travail. Cette période a été choisie pour deux raisons : 1. 2022 est la bathymétrie qui sert de base aux simulations du projet ATLANTIS ; 2. la période 2010 - 2022 représente une période suffisamment longue, qui est postérieure aux derniers grands aménagements réalisés à l'embouchure de l'estuaire (port 2000).

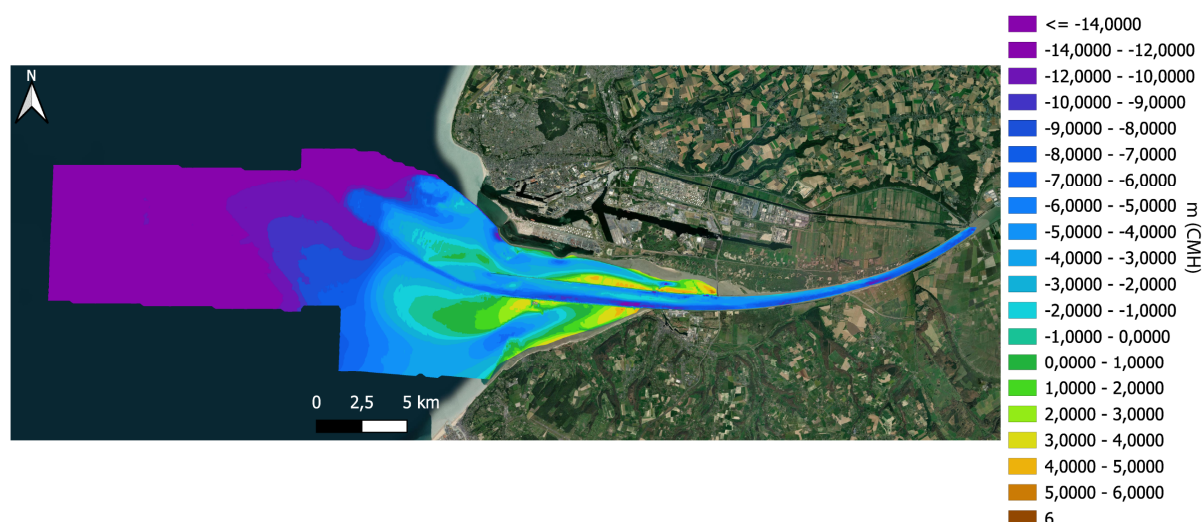


Figure 2 : Carte bathymétrique 2022 (source : HAROPA) et délimitation du périmètre d'étude 1.

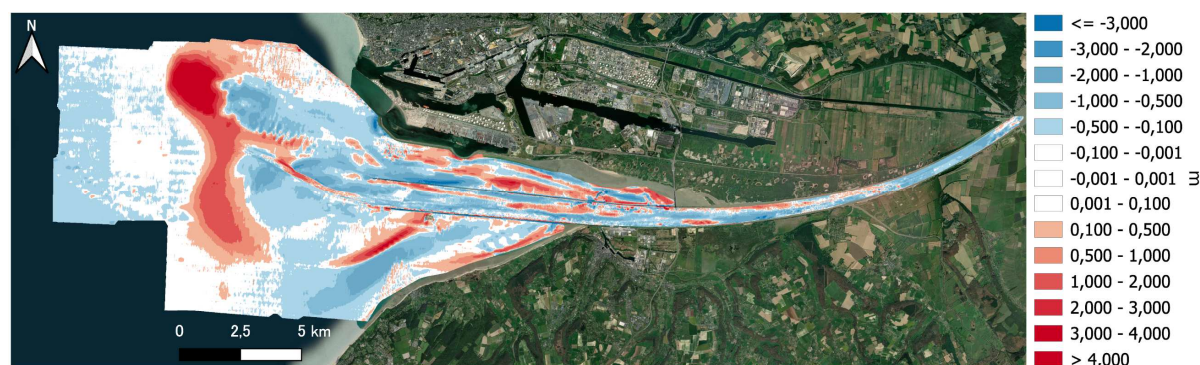


Figure 3 : Evolution morphologique sur la période 2010-2022 (cartes bathymétriques 2022 et 2010, source : HAROPA).

Les taux de sédimentation observés sur cette période sont modifiés et bornés par secteurs pour correspondre aux hypothèses des scénarios cibles. Les connaissances des experts sur l'évolution long-terme des estuaires et spécifiquement de l'estuaire de Seine sont mobilisées dans le but d'ajuster les hypothèses de modification des taux de sédimentation, afin d'obtenir des résultats cohérents avec l'état de l'art.

Encart N°1 – choix des taux de sédimentation à considérer

Les levés bathymétriques réguliers réalisés par HAROPA constituent une base de travail précieuse pour étudier l'évolution morphologique de l'embouchure. Cependant, ces acquisitions mettent en avant une grande variabilité dans les bilans sédimentaires de l'estuaire. Par exemple, si l'on considère la période 2018 – 2022 l'embouchure est globalement en accrétion ($6.88.10^4 \text{ m}^3$), alors qu'entre 2010 et 2022 la tendance est plus à l'érosion ($-9.82.10^3 \text{ m}^3$). Même si cette tendance est globale, ce sont le chenal principal et les fosses qui accumulent la majorité des sédiments depuis 2018 [Figure 4].

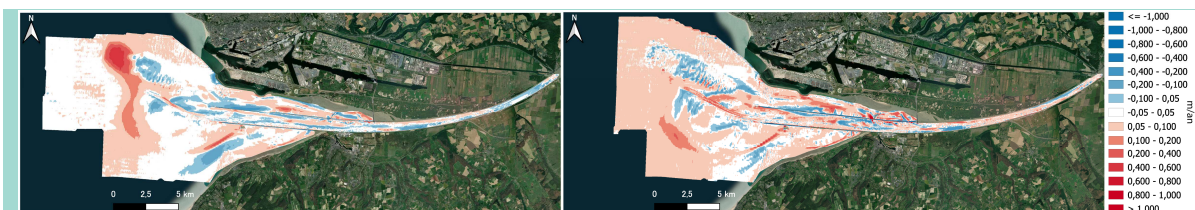


Figure 4 : Evolutions morphologiques normalisées sur 1 an, à gauche sur la période 2010-2022 et à droite sur la période 2018-2022.

Entre 1834 et 2021 (187 ans) l'embouchure a accumulé $8.00.10^8 \text{ m}^3$ de sédiment. Ce remplissage s'est effectué de manière inégale [Figure 5], ce qui illustre l'importance du choix de la période à considérer pour effectuer des projections.

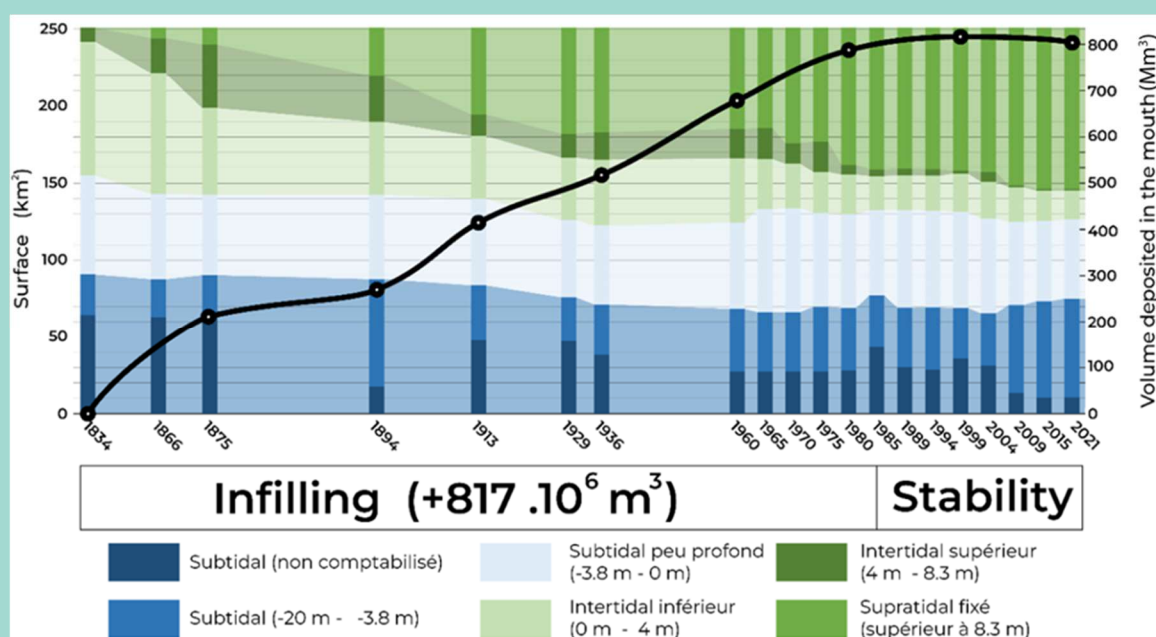


Figure 5 : Evolution en km^2 des domaines sub-, supra- et intertidaux depuis 1834 (modifié de Delsinne, 2005) pour la zone de l'estuaire (Pellen et al., 2025).

En estuaire de Seine, l'évolution des taux de sédimentation est particulièrement difficile à appréhender, car les évolutions sont potentiellement imputables à des évolutions naturelles des forçages, ainsi qu'aux forçages anthropiques (e.g. dragages) et aux aménagements (e.g. polder, digues). Le laps de temps entre 2010 et 2022 est retenu, car c'est la période la plus récente et suffisamment longue qui n'est pas affectée par des aménagements majeurs dans l'embouchure. De plus, elle est cohérente avec les évolutions prospectives simulées dans le cadre du projet MORPHOSEINE et une des tendances d'évolutions définies avec les experts : « évolution différenciée ».

La méthodologie d'adaptation des taux de sédimentation dans l'embouchure, se déroule en 5 étapes (Figure 6Figure 1). La première étape consiste à définir les scénarios d'évolution bathymétriques et est décrite dans la section précédente [partie I]. Ensuite, le secteur de l'embouchure est séparé en cinq domaines présentant des dynamiques sédimentaires différentes : 1. Le chenal principal (chenal) ; 2. les fosses Nord et Sud (fosses) ; 3. les secteurs des bancs du Ratier et d'Amfard (large) ; 4. les domaines plus profonds situés à l'extrémité ouest de la zone d'étude (zone ouest, ces quatre zones constituent le périmètre 1) ; 5. Les zones intertidales et supratidales qui bordent l'embouchure (périmètre 2, décrit partie III). Le différentiel bathymétrique de référence (2022-2010) est découpé selon ces domaines, afin de modifier les taux de sédimentation de chaque secteur séparément (étape 2, Figure 6Figure 1).

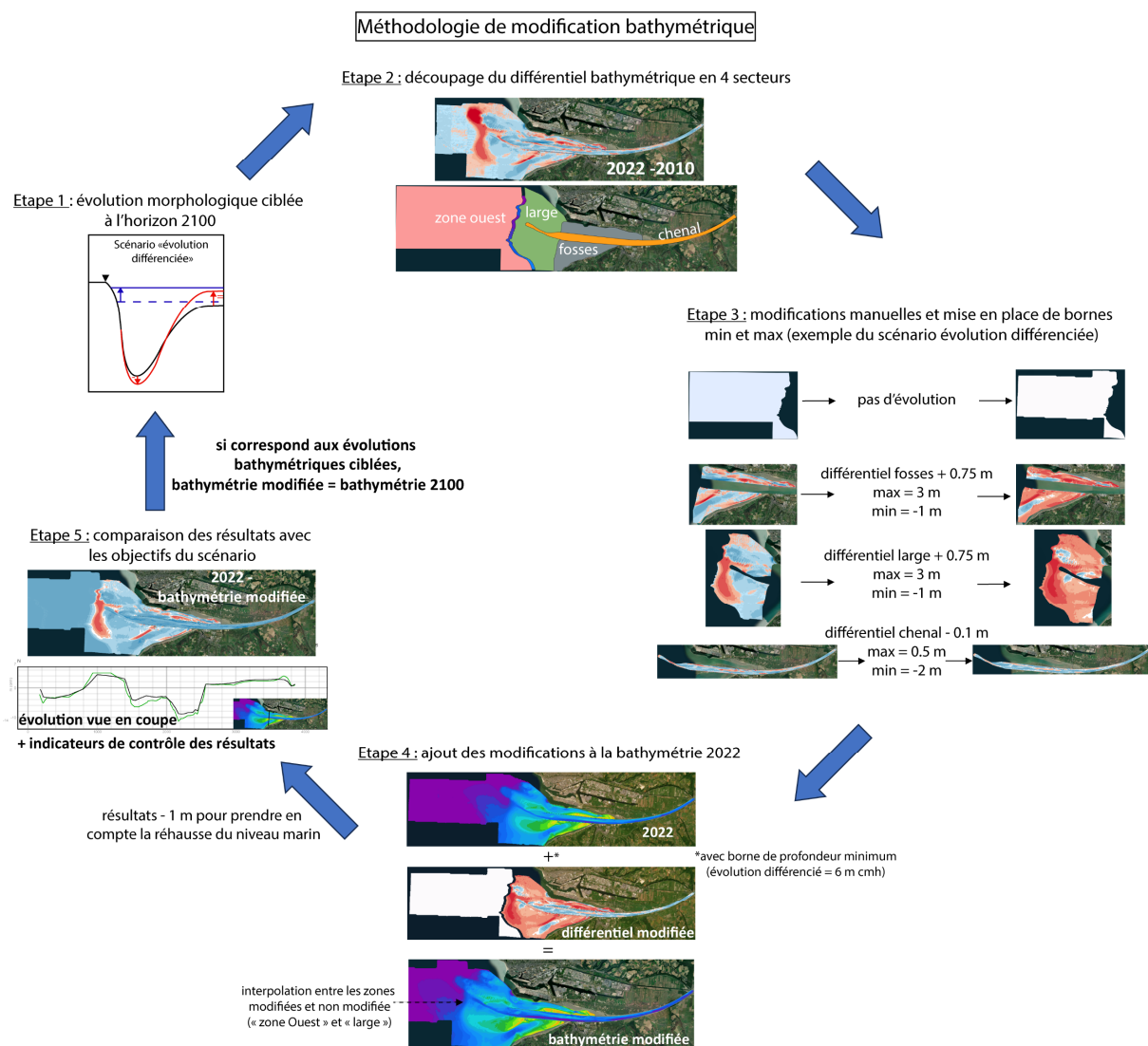


Figure 6 : Méthodologie de modification de la bathymétrie pour représenter les évolutions bathymétriques potentielles à l'horizon 2100 (périmètre 1).

La troisième étape est la modification des taux de sédimentations. Tout d'abord, des bornes d'évolution minimum et maximum sont fixées afin de rester cohérentes avec les objectifs d'évolution [étape 3, Figure 7]. Par exemple, si l'on souhaite, pour le scénario de « réduction topo-bathymétrique », avoir une profondeur à minima égale à l'actuel sur un domaine, la borne d'évolution minimale à fixer est de 1 m de dépôt (niveau marin + 1 m en 2100). Des modifications « manuelles » sont également appliquées pour atteindre les objectifs fixés par scénario [étape 3, Figure 7]. Ensuite, des bornes de profondeurs maximales sont fixées dans le secteur des fosses, dans l'objectif de maintenir les bancs les moins profonds à la cote ciblée dans les scénarios et des digues basses [étape 4.1, Figure 7]. Sur le secteur de la zone ouest aucune modification n'est effectuée, car elle ne présente pas d'évolution depuis les 40 dernières années. Enfin, une méthodologie d'essai/erreur est mise en place pour déterminer les modifications des taux de sédimentation les plus adaptés à chaque scénario (cela comprend la réalisation des étapes 4 et 5 décrites ci-dessous).

Exemple de modification bathymétrique

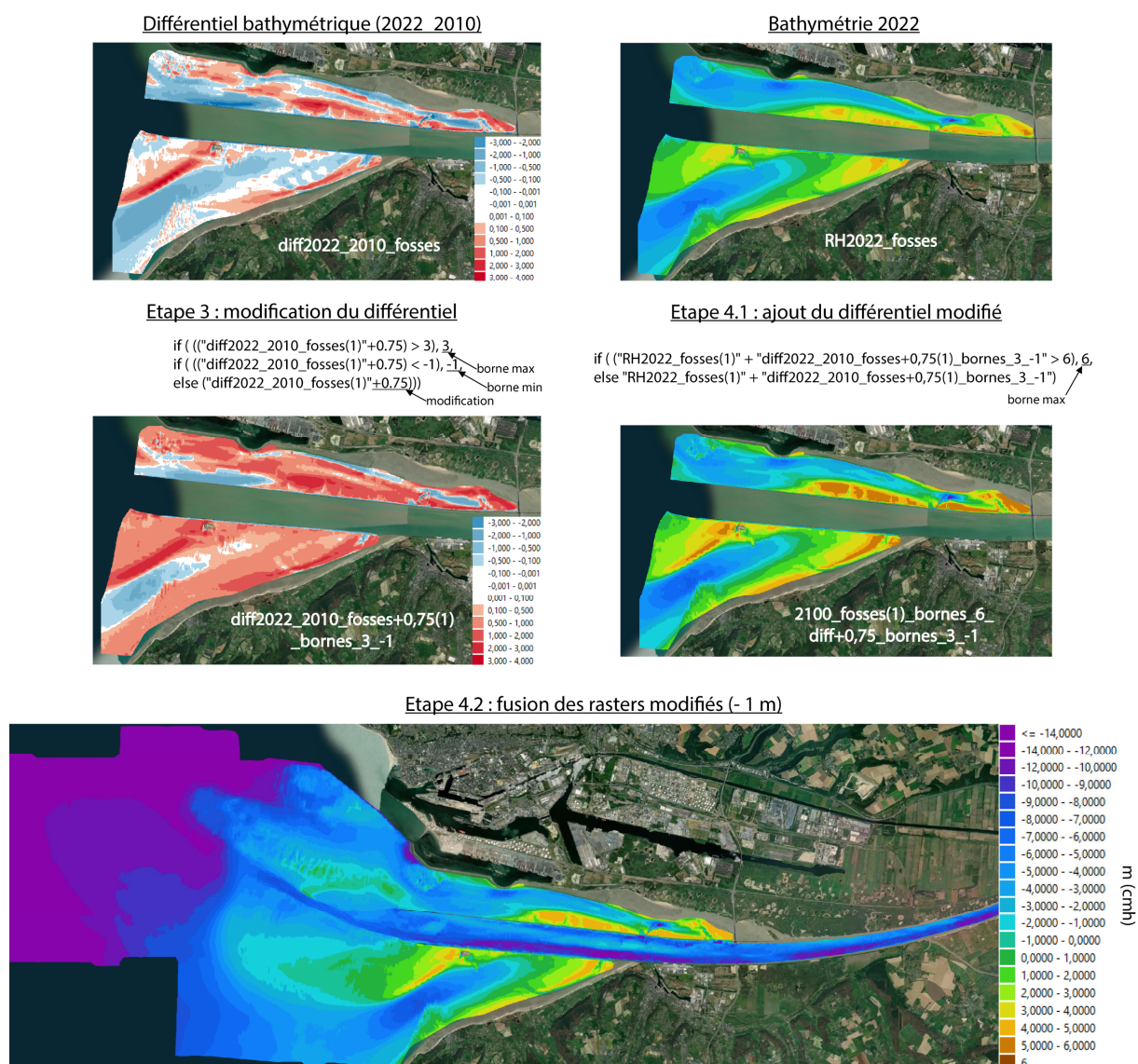


Figure 7 : Exemple de modification bathymétrique, scénario évolution différenciée (étapes 3 et 4, Figure 6).

Une fois les modifications effectuées elles sont fusionnées puis ajoutées à la carte bathymétrique de 2022 (étape 4, Figure 6). Un espace sans données de 1500 m a été volontairement généré entre la zone ouest et la zone large. L'objectif est de réaliser une interpolation entre ces zones afin de ne pas modifier la pente entre les bancs (Ratier et Amfard, dont la profondeur varie entre les scénarios) et les zones plus profondes à l'ouest (non modifiées), tout en permettant la progradation des bancs vers l'ouest proportionnellement à l'élévation verticale mise en place sur les bancs. De plus, le site de clapage du Kannik (qui n'est plus en activité) se situe dans cette bande laissée sans donnée. Cette méthodologie permet donc de ne pas prendre en compte l'impact de cette action anthropique.

Enfin, la dernière étape de la méthodologie consiste à comparer les résultats à la bathymétrie de 2022 et aux objectifs fixés pour chaque scénario, via des coupes et des cartes bathymétriques, ainsi que des indicateurs de contrôles tels que le calcul de taux de sédimentation, de profondeurs moyennes par secteurs et d'évolution des pentes [étape 5, Figure 6]. Les tendances d'accrétion définies dans les

scénarios sont plus simples à vérifier, car il suffit de comparer les zones en question à la profondeur actuelle et à la montée du niveau marin. En revanche, les tendances érosives sont plus complexes à vérifier, car on ne connaît pas l'épaisseur de sédiment disponible, ni la profondeur d'équilibre par rapport aux conditions hydrodynamiques. Seul le calcul des taux de sédimentation comparés aux données historiques permet de se faire une idée de la pertinence des modifications dans le cas du scénario « augmentation topo-bathymétrique ». Ils sont présentés sur tout le secteur de l'embouchure qui a été modifié dans ce rapport, mais ont été calculés par secteur lors de la réalisation de la méthodologie d'essai/erreur [étape 3 à 5, Figure 6]. Les scénarios 2100 sont validés par comparaison de l'ensemble des critères avec les objectifs fixés pour chaque scénario.

III. Modification des zones inter et supratidales bordant l'embouchure (périmètre 2)

Les zones intertidales et supratidales situées sur le secteur de l'embouchure sont également prises en compte dans le cadre des scénarios d'évolution bathymétrique 2100 [Figure 8a]. Elles constituent le second périmètre d'étude [Figure 8a]. Tout d'abord, pour assurer une continuité avec les modifications réalisées pour chaque scénario et car ces zones vont probablement évoluer avec la montée du niveau marin. Les zones déconnectées par des ouvrages ou situées à l'amont du canal de Tancarville ne sont pas modifiées.

Cependant, l'évolution mise en avant par les différences observées dans ce second périmètre d'étude, issus des acquisitions LIDAR (entre 2022 et 2011, Figure 8b) est difficilement exploitable pour projeter des évolutions potentielles à l'horizon 2100. Le différentiel entre les deux cartes bathy-topographiques [Figure 8b] montre principalement : 1. des mouvements horizontaux (divagations de filandres) ; 2. des évolutions dues aux aménagements (comblement du chenal environnemental et filandres associées) ; 3. des incertitudes aux interfaces entre les acquisitions LIDAR et par Sonar Multifaisceaux (périmètres 1 et 2).

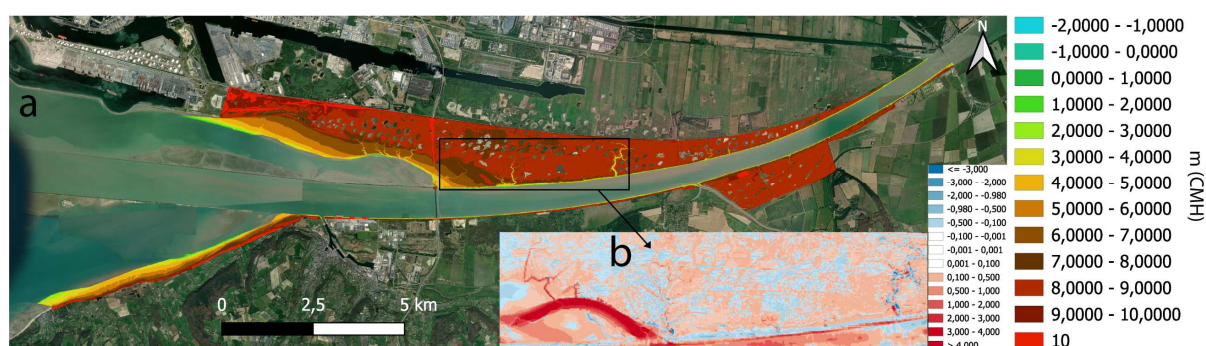


Figure 8 : a. Carte bathy-topographique 2022 et délimitation du périmètre 2 (données issues de l'acquisition LIDAR), sur le secteur étudié dans le cadre de CRONSTIBATH. b. Aperçu de l'évolution de la bathy-topographie dans le périmètre 2.

Ce constat appui la nécessité de développer une méthodologie différente pour les zones situées dans ce second périmètre, par rapport à celle employée dans le secteur principale (périmètre 1, Figure 2). L'évolution morphologique mise en place sur le périmètre 2 est donc basée sur des concepts et

connaissances théoriques. Sans connaissance précise de l'évolution des forçages et des apports sédimentaires il y a trois possibilités :

1. Les forçages s'intensifient et les apports sédimentaires sont très réduits. Dans ce contexte, le secteur pourrait être globalement en érosion.
2. Dans la situation inverse, les zones intertidales seraient probablement en accrétion et même de façon plus rapide que la montée du niveau marin.
3. Les forçages n'évoluent pas significativement et les apports sédimentaires sont suffisants. Dans ce cas, il est probable que la morphologie du secteur suive l'évolution du niveau marin.

Bien que simpliste, cette approche permet d'obtenir trois scénarios contrastés sur les zones inter et supratidales du périmètre 2, dont les évolutions correspondent aux scénarios définis à dire d'experts sur le périmètre 1. Afin de ne pas générer d'artefact à l'interface entre ces deux périmètres tout en prenant en compte une évolution positive ou négative, les modifications sont effectuées sur le principe suivant :

$$\text{"topo_2100"} = \text{"MNT2022"} - /+ (1/\text{"MNT2022"})$$

Cela permet de mettre en place des modifications plus importantes dans les zones basses (i.e. à la jonction entre les deux périmètres) et plus faible sur les points hauts, qui sont moins susceptibles d'évoluer. Les résultats, joints avec les scénarios bathymétriques mis en place sur le périmètre 1, sont présentés Figure 13.

IV. Modification de la bathymétrie amont de l'embouchure et jonction avec les scénarios de l'embouchure (périmètre 3)

Sur la partie amont de Tancarville, les données bathymétriques intégrées au MNT utilisé dans le modèle TELEMAC par le CEREMA dans le cadre du projet ATLANTIS, sont composées :

- De la bathymétrie de mai 2022 acquise par HAROPA entre Tancarville et le pont Guillaume le conquérant à Rouen
- D'un ensemble de données bathymétriques acquises par point kilométrique entre 2017 et 2022 par VNF

Dans l'objectif se focaliser sur l'influence de l'évolution topo-bathymétrique de l'embouchure et limiter le nombre de scénarios à simuler, la morphologie du fond n'est pas modifiée à l'amont de Tancarville.

La modification de la bathymétrie amont apparaît comme moins pertinente qu'à l'embouchure d'après les différentiels bathymétriques réalisés à l'amont de Tancarville (évolutions très faibles en comparaison de l'embouchure). En effet la bathymétrie à l'amont de Tancarville est contrainte par le maintien de l'usage de navigation et est moins impactée par une évolution naturelle, notamment dans la zone du chenal. Le chenal principal de la Seine sur sa partie navigable est régulièrement dragué par HAROPA, afin de maintenir la navigation de l'embouchure jusqu'à Rouen et, dans une moindre mesure, par VNF en amont de Rouen.

La bathymétrie à l'amont de Tancarville n'est modifiée que sur la zone de jonction avec la bathymétrie de l'embouchure dans le lit mineur [Figure 9]. L'objectif est d'éviter la génération de pentes trop fortes et incohérentes qui pourraient influencer l'hydrodynamique dans la zone de jonction entre la partie aval (modifiée) et amont (non modifiée).

Cette zone de jonction est située proche de Tancarville, dans une zone où les données bathymétriques amont/embouchure se superposent. A cet endroit les valeurs bathymétriques ont été interpolées de manière linéaire sur une bande de 25 m afin d'assurer une transition progressive et cohérente entre les deux zones.

Pour chaque scénario « augmentation », « réduction » et « évolution différenciée » une bathy-topographie est proposée sur une emprise couvrant le lit mineur de la Seine et l'embouchure entre le barrage de Poses et le site de clapage du Machu [Figure 9].



Figure 9 : Scénario « augmentation topo-bathymétrique » intégrant tout l'estuaire, la zone d'interpolation entre les périmètres 1 et 3 est représentée par un carré noir.

RESULTATS

I. Comparaison des résultats

Dans l'objectif de mieux appréhender les évolutions contrastées mises en place, des comparaisons entre les résultats des différents scénarios sont présentées dans un premier temps et les scénarios sont décrits individuellement dans les parties suivantes [p23, p26, p29].

Encart N°2 – aide à la lecture des résultats

Le projet CRONSTIBATH a pour objectif de proposer des évolutions topo-bathymétriques du secteur de l'embouchure, c'est-à-dire en prenant en compte l'évolution des fonds sédimentaires et la montée du niveau marin moyen. Pour bien distinguer l'influence de ces deux paramètres, les résultats sont présentés soit : 1. d'un point de vue purement morphologique (i.e. du point de vue de la couche sédimentaire et donc sans prise en compte de la montée du niveau marin) ; 2. d'un point de vue topo-bathymétrique (i.e. de la variation de la hauteur de la colonne d'eau, qui comprend donc l'évolution morphologique et la hausse du niveau marin) Figure 4. Ainsi, si l'on considère une élévation du niveau marin de + 1 m et aucune évolution de la couche sédimentaire, la colonne d'eau sera plus importante de 1 m (i.e. la profondeur moyenne augmentera de 1 m du fait de l'élévation du niveau de référence, Figure 11a). Dans le cas d'une élévation du niveau marin et de la couche sédimentaire égales, la hauteur de la colonne d'eau restera identique [Figure 11b].

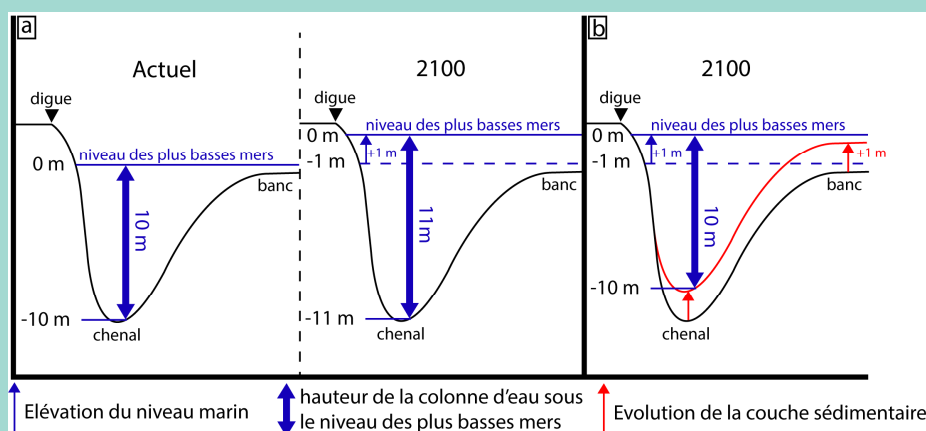


Figure 10 : a. schéma explicatif de l'évolution de la hauteur de la colonne d'eau dans le contexte de montée du niveau marin moyen de 1 m, et b. dans un contexte de montée du niveau marin moyen et d'accrétion sédimentaire égales.

Afin de prendre virtuellement en compte cet approfondissement dû à la montée du niveau marin de 1 m, ce dernier est ajouté aux représentations topo-bathymétriques des résultats. La profondeur étant représentée de façon négative sous le niveau des plus basses marées (vives eaux exceptionnelles) en CMH (Cote Marine du Havre), -1 m est ajouté aux cartes et coupes visant à montrer l'évolution topo-bathymétrique. Cela revient à placer le niveau 0 m (CMH), et donc le niveau des plus basses marées, 1 m plus haut (Figure 10).

Il est important de retenir que les cartes et coupes représentant une évolution morphologique ne prennent en compte que la variation de la couche sédimentaire (pas de modification du référentiel). Alors que l'élévation du niveau marin de 1 m est systématiquement ajoutée aux cartes et coupes topo-bathymétriques représentant la profondeur moyenne par rapport au référentiel des plus basses mers en 2100 (qui sera 1 m plus haut si l'on ne considère pas d'évolution de la marée).

Cet exercice n'est réalisé que dans un souci de visualisation de la situation en 2100. Les cartes fournies au projet ATLANTIS sont référencées par rapport à la situation actuelle et la hausse du niveau marin sera ajoutée dans les simulations.

1. Evolutions topo-bathymétriques (périmètres 1 et 2)

Dans cette section, il est question d'évolution topo-bathymétrique. La Figure 11, présente les cartes de l'ensemble des scénarios mis en place, ainsi que la topo-bathymétrie de 2022 et la Figure 12 représente les évolutions topo-bathymétriques en coupe. Dans les zones les plus profondes à l'Ouest du profil (Figure 12d), la zone où la morphologie n'a pas été modifiée, on observe cette différence évoquée dans l'encart précédent de 1 m, dû à la montée du niveau marin moyen.

Globalement, la profondeur des différents domaines correspond bien aux objectifs fixés : 1. "scénario augmentation topo-bathymétrique" : plus profond que 2022 sur tous les domaines ; 2. "scénario réduction topo-bathymétrique" : moins profond ou égal à 2022 sur tous les domaines ; 3. "évolution différenciée" : profondeur similaire sur les bancs et plus profond dans les chenaux (Figure 11, Figure 12). De plus, la méthodologie d'interpolation mise en place à la limite Ouest des bancs a permis de reproduire la progradation des bancs vers le large pour les scénarios "réduction topo-bathymétrique" et "évolution différenciée" (Figure 12d).

L'illustration des évolutions en coupe permet également de mettre en avant les limites de la méthode. Par exemple, le top de certains bancs sédimentaires situés dans la fosse Nord est plat dans le scénario "évolution différenciée" (Figure 12a) et dans le scénario "réduction bathymétrique" (Figure 12a,b). Cela est dû aux bornes de profondeurs maximales fixées lors des modifications et démontre la difficulté de l'exercice pour fixer des bornes de profondeur et d'évolution, ainsi que les modifications manuelles en lien avec les objectifs des scénarios, tout en conservant une morphologie la plus « naturelle » possible. En effet, la modification des taux de sédimentation s'effectue par zone, il est donc inévitable que localement la sédimentation soit excessive ou inversement. Ces rares anomalies sont détaillées spatialement pour chaque scénario dans les parties suivantes (p23, p26, p29).

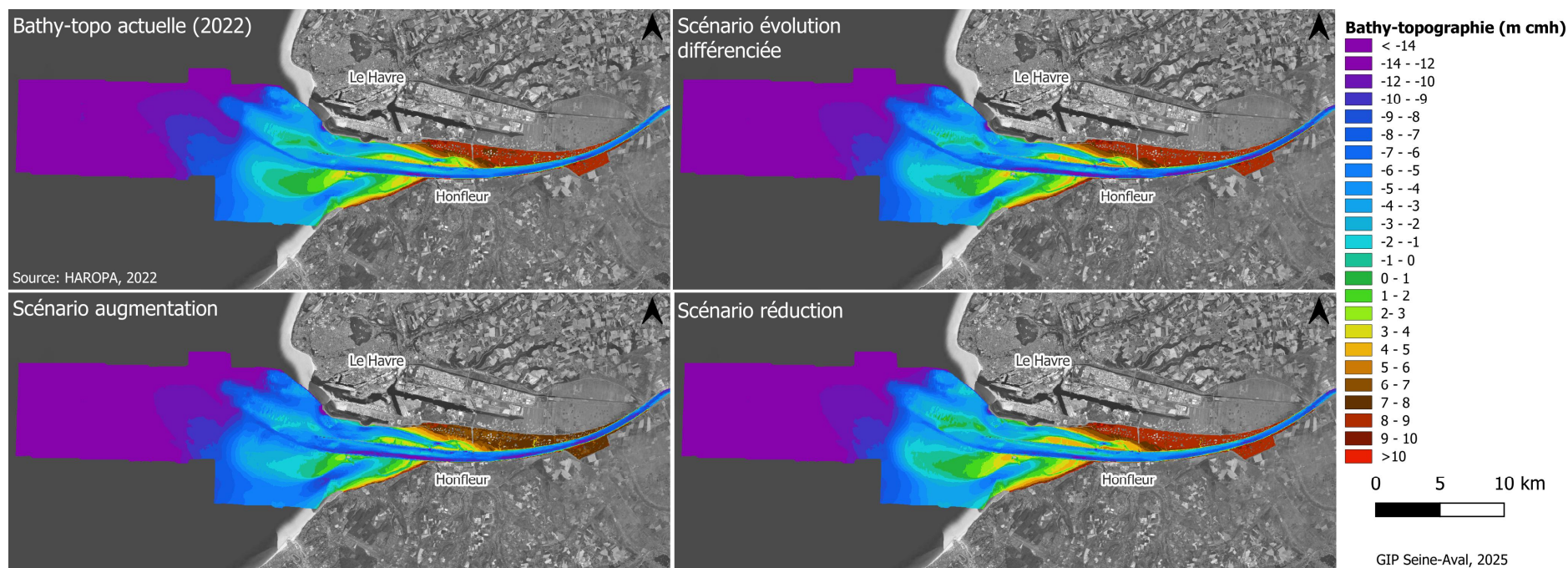


Figure 11 : Cartes topo-bathymétriques du secteur de l'embouchure en 2022 (source : HAROPA) et des trois scénarios 2100 générés (niveau marin +1 m pris en compte). Les différences entre les scénarios 2100 et 2022 sont présentées individuellement (parties II. III. et IV. des résultats).

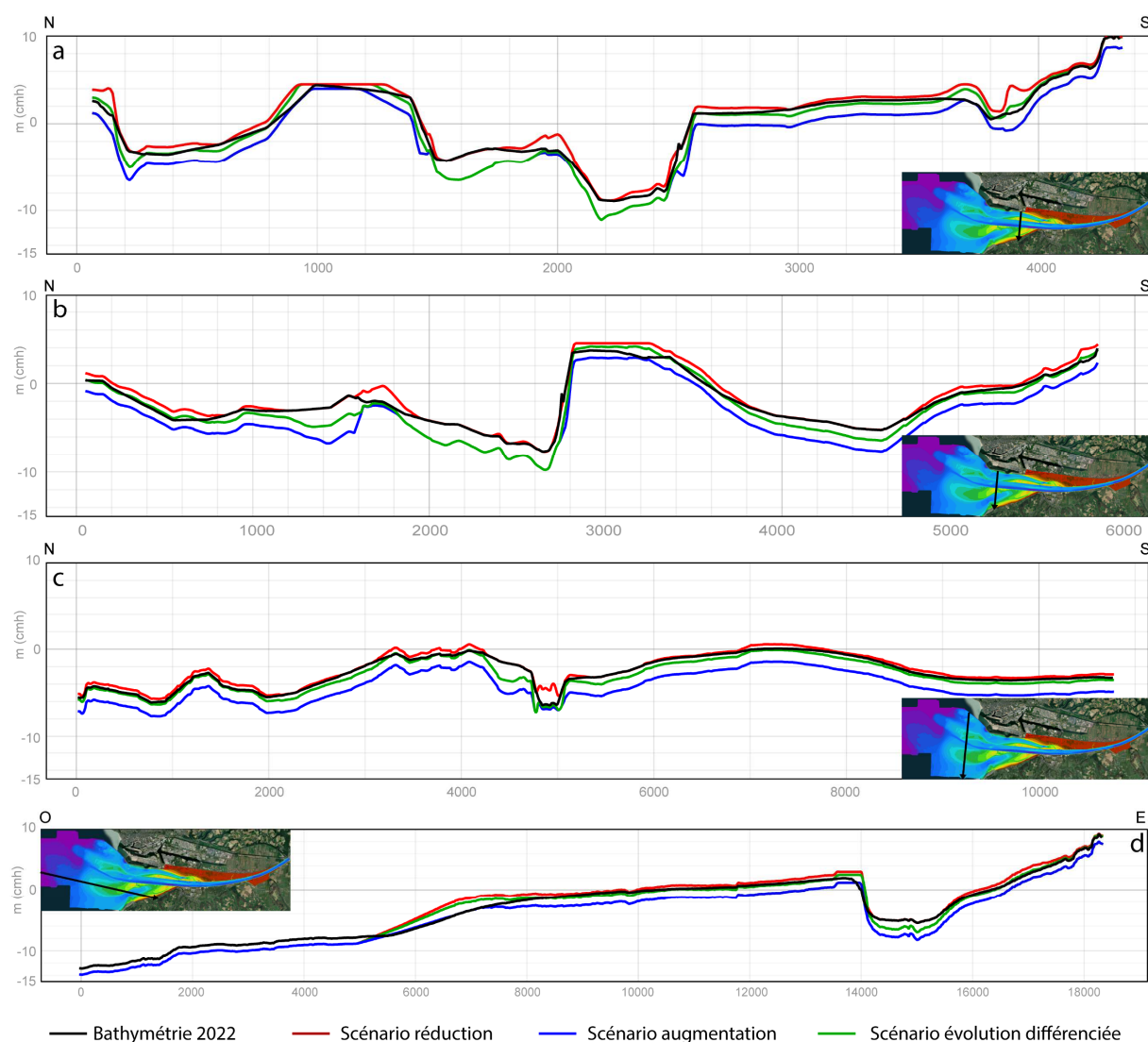


Figure 12 : Coupes des évolutions bathymétriques (i.e. de la profondeur, avec le niveau marin + 1 m inclus) des trois scénarios comparés à la bathymétrie en 2022.

2. Evolutions des zones inter et supra-tidales de l'embouchure (périmètre 2)

Dans le cas des modifications de la zone acquise avec le LIDAR (périmètre 2), l'objectif est à la fois d'assurer une bonne cohérence avec les modifications de la bathymétrie du périmètre 1 et atteindre un objectif spécifique pour chaque scénario. La jonction se trouve proche des 250-300 m pour la fosse Nord et 750-800 m pour la fosse Sud (Figure 13). Sur les deux coupes, la jonction ne présente pas de rupture de pente ce qui signifie que les deux modifications sont cohérentes (Figure 13). En ce qui concerne les objectifs, le scénario "réduction topo-bathymétrique" présente bien une profondeur inférieure à 2022, le scénario "évolution différenciée" une profondeur similaire à légèrement

supérieure selon les secteurs et le scénario "augmentation topo-bathymétrique" une profondeur plus importante d'un peu plus de 1 m (Figure 13).

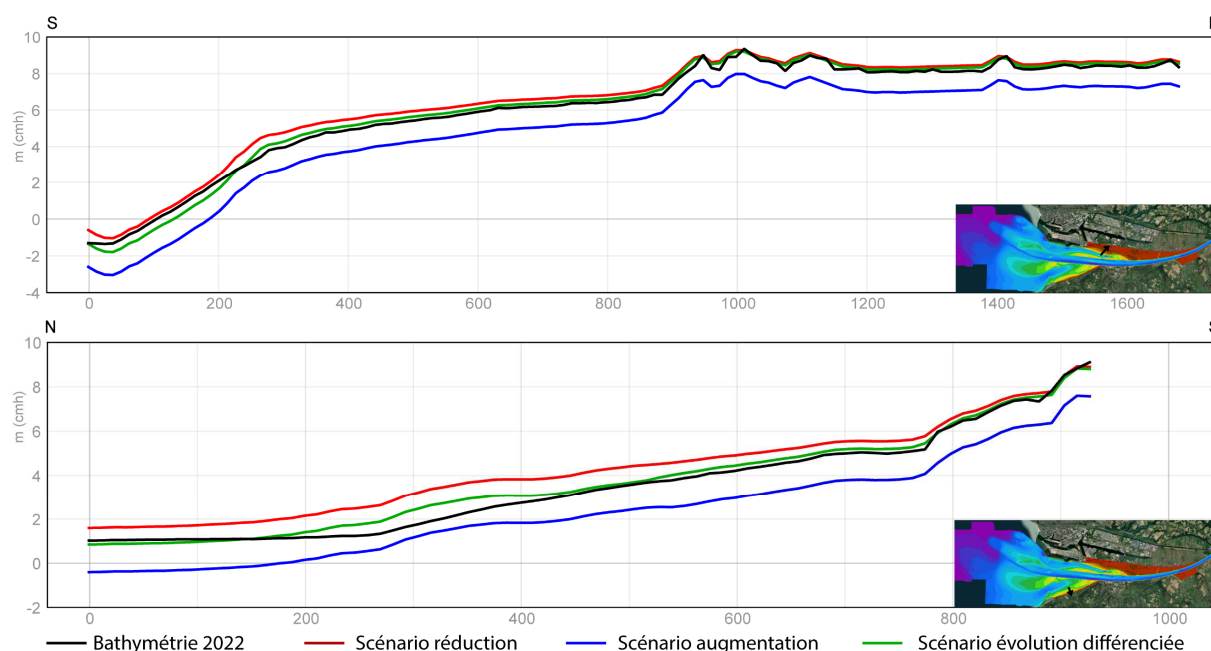


Figure 13 : Coupes des évolutions topo-bathymétriques à la jonction entre les périmètres 1 et 2 (niveau marin + 1 m inclus) des trois scénarios comparés à la topo-bathymétrie de 2022, dans les fosses Nord et Sud.

3. Evolutions des pentes (périmètres 1 et 2)

Le calcul de l'inclinaison du terrain fait partie des critères de validation des scénarios, car les modifications peuvent introduire des changements de pente significatifs et influencer l'hydrodynamique. L'objectif de comparer l'ensemble des scénarios en coupe est d'identifier les zones présentant les valeurs les plus fortes selon les scénarios et d'identifier les différences par rapport au contexte de 2022. La Figure 14 montre des modifications des pentes globalement très faibles et même au niveau de la zone interpolée entre les bancs et les zones plus profondes à l'Ouest (moins de 1°). A la jonction entre les domaines (chenaux et bancs principalement), les pentes sont légèrement plus fortes pour tous les scénarios qu'en 2022. Cependant, dans le scénario "évolution différenciée" les pentes sont plus importantes de 1 à 3,5° maximum qu'en 2022 au niveau de la jonction entre la fosse

Sud et le banc du ratier (Figure 14a), ainsi qu'entre le chenal principal et les bancs du Ratier et d'Amfard (Figure 14b).

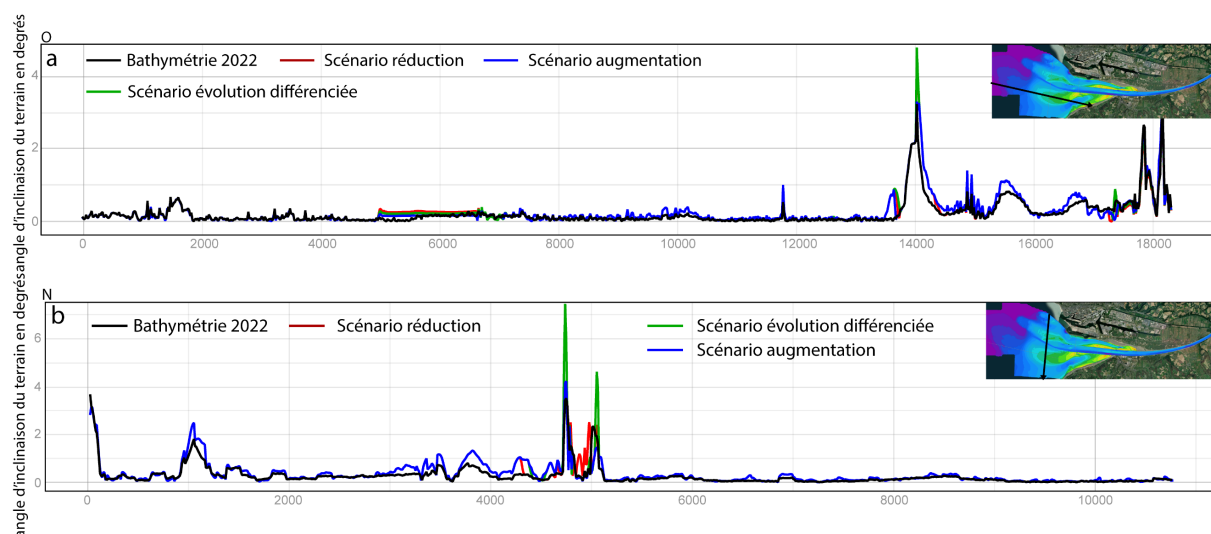


Figure 14 : Coupes présentant l'inclinaison du terrain des trois scénarios comparés à la situation de 2022.

II. Scénario « augmentation topo-bathymétrique »

1. Evolution morphologique/topo-bathymétrique

Les évolutions morphologiques mises en place dans le cadre du scénario "augmentation topo-bathymétrique" génèrent globalement de l'érosion sur le secteur de l'embouchure (Figure 15). Sur le périmètre 2, entre 0.5 et 0.1 m de sédiment sont érodés. Dans le périmètre 1, les évolutions sont beaucoup plus variées et influencées par le différentiel bathymétrique qui a servi de base aux modifications. Les érosions les plus intenses sont observées dans les chenaux (particulièrement dans les fosses, Figure 15). Des dépôts sont visibles sur les bancs situés dans les fosses et le chenal principal (0.1 à 1 m), ainsi que sur le talus séparant les zones les plus profondes à l'Ouest et les bancs d'Amfard et du Ratier (Figure 15).

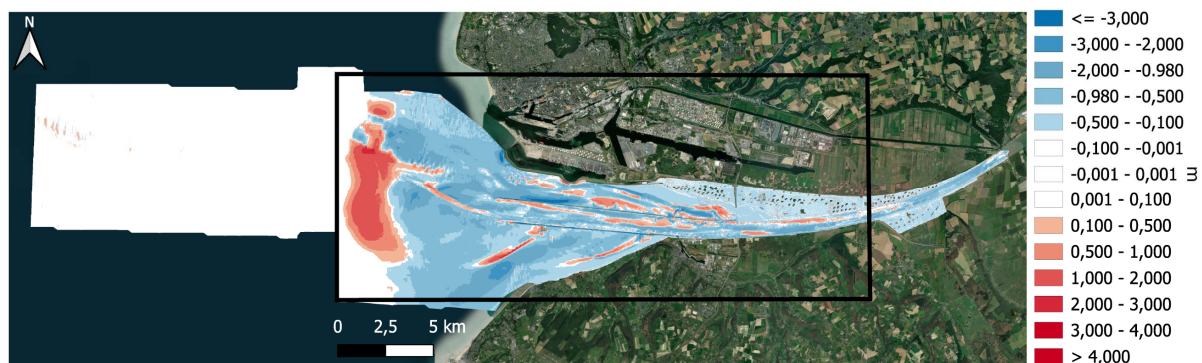


Figure 15 : Evolution morphologique pour le scénario 2100 "augmentation topo-bathymétrique", par rapport à la morphologie de 2022. Le cadre noir représente l'emprise des calculs de volumes réalisés dans le projet PSES (Pellen et al., 2025).

Les objectifs fixés pour chaque scénario sont bien topo-bathymétriques, ce qui signifie que l'évolution de la hauteur de la colonne d'eau (par rapport aux plus basses mers) en 2100 est comparée au contexte de 2022. Dans le cas du scénario "augmentation topo-bathymétrique" le but est d'obtenir un contexte plus profond qu'en 2022. C'est bien ce que l'on observe sur la Figure 16, où seule une zone située dans la zone d'interpolation entre les bancs et le secteur plus profond présente une bathymétrie moindre en 2100 qu'en 2022 (environ 0.5 m à 1 m, ainsi que très localement au niveau du banc du Ratier).



Figure 16 : Evolution topo-bathymétrique (niveau marin + 1 m) pour le scénario 2100 "augmentation topo-bathymétrique", par rapport à la topo-bathymétrie de 2022.

2. Critères de validation

Une fois les modifications effectuées, plusieurs critères de validations sont calculés : 1. la profondeur moyenne des domaines ; 2. l'inclinaison du terrain ; 3. le taux de sédimentation (volume déposé/érodé).

La profondeur moyenne permet d'appréhender rapidement, et de manière globale, l'évolution de la profondeur et ainsi identifier les évolutions potentiellement aberrantes. Dans le cas du scénario "augmentation topo-bathymétrique" les résultats correspondent bien aux objectifs avec en moyenne 40-50 cm (large et chenal) à 70 cm (fosses) d'érosion et donc des profondeurs moyennes en 2100 supérieures de 1.4 m à 1.7 m.

Tableau 1 : Comparaison des profondeurs moyennes entre le scénario 2100 "augmentation topo-bathymétrique" et 2022, pour chaque secteur bathymétrique de l'embouchure (polygones définis Figure 6).

Profondeur moyenne (m cmh)	2022	2100 Augmentation	2100 Augmentation (élévation niveau marin + 1 m)
Polygone chenal	-5.2	-5.73	-6.73
Polygone fosses	-0.5	-1.18	-2.18
Polygone large	-3.41	-3.81	-4.81
Polygone ouest	-15.47	-15.47	-16.47

Ensuite, la Figure 17 présente l'inclinaison du terrain en 2022 et en 2100 dans le cas du scénario « augmentation topo-bathymétrique ». Sur le secteur de l'embouchure les pentes sont relativement fortes en 2022 dans les fosses et à la jonction entre le chenal principal et les domaines voisins. Ces fortes pentes sont principalement dues aux aménagements (digues submersibles) et l'entretien du chenal de navigation. Les pentes les plus importantes identifiées sont situées au centre de la fosse nord et sont le résultat d'une rupture de la digue submersible.

Le scénario mis en place montre une inclinaison du terrain globalement similaire à 2022 (Figure 14, Figure 17), avec une augmentation raisonnable de la pente entre le chenal de navigation et les parties moins profondes du chenal principal.



Figure 17 : Inclinaison du terrain en degrés, en haut en 2022 et en bas, pour le scénario "augmentation topo-bathymétrique".

Le dernier critère de validation concerne le taux de sédimentation. Il est d'une importance capitale pour ce scénario « augmentation topo-bathymétrie », car c'est le seul critère permettant de juger de l'ampleur de l'érosion mise en place. Afin de qualifier l'érosion globale mise en place (insuffisante ou aberrante), le volume sédimentaire érodé est comparé aux données historiques (issues du projet SA7-PSES, Pellen et al., 2025) et également ramené à un taux de sédimentation en m/an. Sans comparaison, un taux de sédimentation d'environ -5 mm/an ne semble pas excessif et inversement (Tableau 2). Une seule période érosive (suffisamment longue) a été identifiée dans le projet PSES. Il s'agit de l'intervalle le plus récent étudié dans ce projet : 1999 – 2021. Sur ces 22 ans, une érosion approximative de $-0.20.10^8 \text{ m}^3$ a été mise en avant (ce taux de sédimentation ramené à 78 ans correspond à $-7.1.10^7 \text{ m}^3$). La projection imaginée dans le cadre de ce scénario correspond bien à un prolongement de cette tendance entre 2022 et 2100 (Tableau 2).

Tableau 2 : Volume sédimentaire déposé ou érodé entre 2022 et 2100 et taux de sédimentation annuel associé pour le scénario "augmentation topo-bathymétrie". Le calcul a été effectué sur le périmètre 1 et sur l'ensemble du domaine modifié (zone ouest exclue dans les deux cas, Figure 6).

2100 Augmentation	Volume (m^3)	Taux de sédimentation (m/an)
Périmètre 1	$-5.75.10^7$	$-5.75.10^{-3}$
Ensemble du domaine modifié	$-6.13.10^7$	$-5.16.10^{-3}$

III. Scénario « réduction topo-bathymétrie »

1. Evolution morphologique/topo-bathymétrie

Le scénario « réduction topo-bathymétrie » vise un contexte globalement moins profond en 2100 qu'en 2022. Une accrétion sédimentaire importante a donc été mise en place sur tous les domaines (à l'exception des zones profondes à l'Ouest qui ne sont pas modifiées), car elle doit être plus rapide que la montée du niveau marin. Les évolutions morphologiques les plus faibles sont donc de + 1 m et les plus fortes allant jusqu'à plus de + 4 m (Figure 18). Les dépôts les plus importants correspondent à une progradation des bancs en direction de l'Ouest. A noter que de rares zones sont situées sous la barre des + 1 m. Elles sont situées dans des zones où des interventions manuelles ont été effectuées (maintien des bancs à la côte des digues basses dans les fosses Nord et Sud, et dans la zone d'interpolation au niveau du site du Kannik).

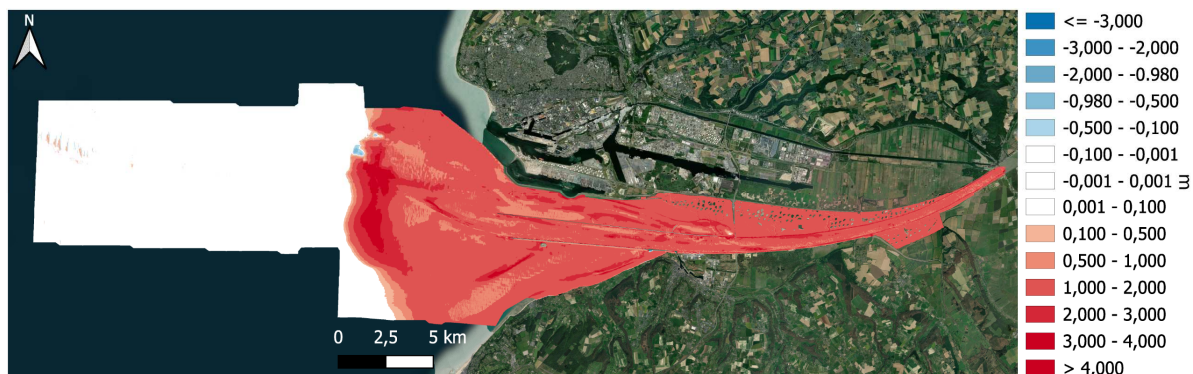


Figure 18 : Evolution morphologique pour le scénario 2100 "réduction topo-bathymétrique", par rapport à la morphologie de 2022.

En terme topo-bathymétrie, ces évolutions permettent d'avoir globalement : 1. des bancs moins profonds de 0.1 m à 1 m qu'en 2022 (Figure 19) ; 2. des chenaux (chenal principal et dans les fosses) de profondeur égale à 2022 à moins profond (1,5 m maximum) ; 3. les bancs du Ratier et d'Amfard qui progradent vers l'ouest entre 1 et 2 km (conséquence d'un scénario où l'hypothèse est d'avoir des apports sédimentaires importants).



Figure 19 : Evolution topo-bathymétrique (niveau marin + 1 m) pour le scénario 2100 "réduction topo-bathymétrique", par rapport à la topo-bathymétrie de 2022.

2. Critères de validation

Dans le cas d'un scénario d'accrétion sédimentaire, la profondeur moyenne est un bon indicateur de contrôle pour juger de l'ampleur des évolutions. Tous les domaines sont moins profonds de 0.32 m à 0.67 m en 2100 pour le scénario « réduction topo-bathymétrique » qu'en 2022 (Tableau 3). Une diminution plus importante de la profondeur est observée sur le domaine « large » que dans les « fosses » (0.67 m et 0.44 m), alors qu'une évolution similaire est attendue sur tous les bancs de l'embouchure. Cette différence de profondeur moyenne entre les deux domaines s'explique en deux points : 1. l'évolution verticale des bancs dans les fosses est contrainte par la cote des digues submersibles, contrairement au domaine large ; 2. les fosses contiennent des chenaux qui accumulent moins de sédiments.

Tableau 3 : Comparaison des profondeurs moyennes entre le scénario 2100 "réduction topo-bathymétrique" et 2022, pour chaque secteur bathymétrique de l'embouchure (polygones définis Figure 6).

Profondeur moyenne (m cmh)	2022	2100 Réduction	2100 Réduction (élévation niveau marin + 1 m)
Polygone chenal	-5.2	-3.88	-4.88
Polygone fosses	-0.5	0.96	-0.04
Polygone large	-3.41	-1.74	-2.74
Polygone ouest	-15.47	-15.47	-16.47

Les modifications apportées dans le cadre de ce scénario ne modifient pas significativement l'inclinaison du terrain (Figure 17, Figure 20). Néanmoins, ce scénario présente la pente la plus importante à la jonction entre les domaines « large » et « zone ouest ». Cette augmentation de la pente du talus est inévitable, car les zones modifiées sont considérablement réhaussées (hypothèse du scénario) alors que la morphologie des zones profondes situées à l'ouest ne sont pas modifiées. Cependant, cette augmentation est minime (0.2° , Figure 14) et ne devrait pas influencer significativement l'hydrodynamique.



Figure 20 : Inclinaison du terrain en degrés pour le scénario "réduction topo-bathymétrique".

Le taux de sédimentation calculé pour ce scénario « réduction topo-bathymétrique » est raisonnable pour un scénario de forte accrétion sédimentaire (entre 1.5 et 2 cm/an). Ensuite, le volume total est comparé aux données historiques, ainsi qu'à l'espace d'accommodation généré par la montée du niveau marin. En accord avec les objectifs du scénario, le remplissage sédimentaire doit être plus rapide que la montée du niveau marin et c'est bien ce qui est observé avec : $2.22.10^8 \text{ m}^3$ de sédiment déposés et un espace d'accommodation de $1.52.10^8 \text{ m}^3$ (topo incluse et zone ouest exclus). Malgré cela, l'évolution morphologique mise en place reste inférieure à la vitesse des dépôts observés dans les données historiques (approximatives) : 1936-2021 (85 ans) = $2.80.10^8 \text{ m}^3$; 1834-1913 (79 ans) = $4.20.10^8 \text{ m}^3$; 1913-1989 (76 ans) = $3.80.10^8 \text{ m}^3$ (projet SA7-PSES, Pellen et al., 2025).

Tableau 4 : Volume sédimentaire déposé ou érodé entre 2022 et 2100 et taux de sédimentation annuel associé pour le scénario "réduction topo-bathymétrique". Le calcul a été effectué sur le périmètre 1 et sur l'ensemble du domaine modifié (zone ouest exclue dans les deux cas).

2100 Réduction	Volume (m ³)	Taux de sédimentation (m/an)
Périmètre 1	1.88.10 ⁸	1.88.10 ⁻²
Ensemble du domaine modifié	2.22.10 ⁸	1.87.10 ⁻²

IV.Scénario « évolution différenciée »

1. Evolution morphologique/topo-bathymétrique

Le scénario « évolution différenciée » a pour objectif de générer un contexte dans lequel l'évolution est différente selon les domaines hypsométriques, où les chenaux s'approfondissent et les bancs sédimentent pour se maintenir à une profondeur similaire à l'actuel. Cette dynamique sédimentaire de l'embouchure a été mise en avant grâce aux acquisitions bathymétriques régulières effectuées par HAROPA port (Figure 3) et aux simulations effectuées dans le cadre du projet MORPHOSEINE (Grasso et al. 2021). Des simulations morpho-sédimentaires prospectives (2016-2066) ont été réalisées selon deux scénarios de montée du niveau marin. Dans les deux cas les simulations ont démontré la capacité des bancs à suivre l'évolution du niveau marin (avec des apports sédimentaires suffisants) et mis en avant de l'érosion dans les chenaux.

Les modifications mises en place dans le cadre de ce scénario ont permis d'éroder la couche sédimentaire dans le chenal principal et dans les chenaux situés dans les fosses (entre quelques centimètres et -2 m localement, Figure 21). A l'inverse, des dépôts sédimentaires entre + 0.5 cm et + 3 m localement sont mis en place sur les bancs d'Amfard, du Ratier et situés dans les fosses. Les zones présentant les dépôts les plus importants sont situées à l'interface entre les zones non modifiées à l'Ouest et à la zone « large » (Figure 21) et témoignent d'une progradation des bancs vers l'Ouest, lié à la sédimentation sur les bancs.

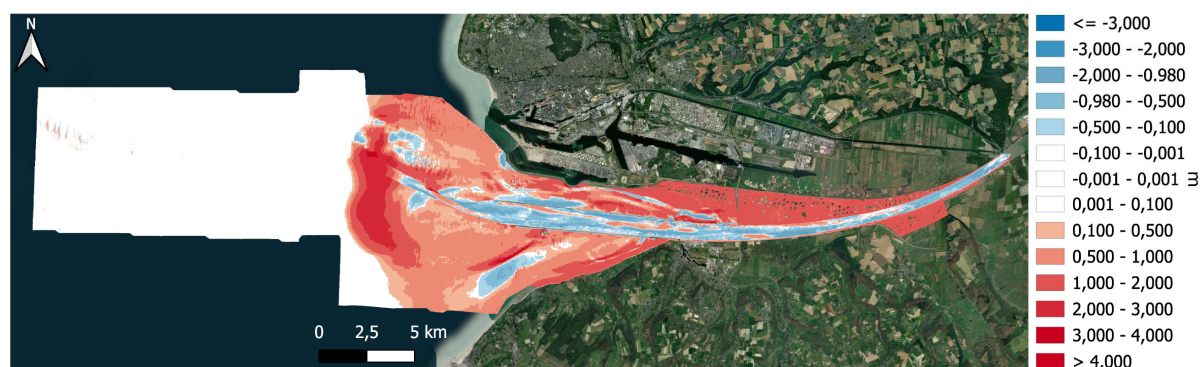


Figure 21 : Evolution morphologique pour le scénario 2100 "évolution différenciée", par rapport à la morphologie de 2022.

Si l'on observe ces modifications d'un point de vue topo-bathymétrique, nous retrouvons bien les chenaux plus profonds qu'en 2022, mais également les bancs d'Amfard et du Ratier (entre -0.1 et -0.5

m principalement). Ces bancs sont plus profonds de quelques centimètres seulement par rapport à l'actuel (5 cm en moyenne au niveau du polygone large Tableau 5), ce qui est cohérent avec les résultats des modélisations du projet MORPHOSEINE qui démontrent une sédimentation légèrement plus faible sur les bancs que la montée du niveau marin. Le faible écart de profondeur est également visible en coupe Figure 12.

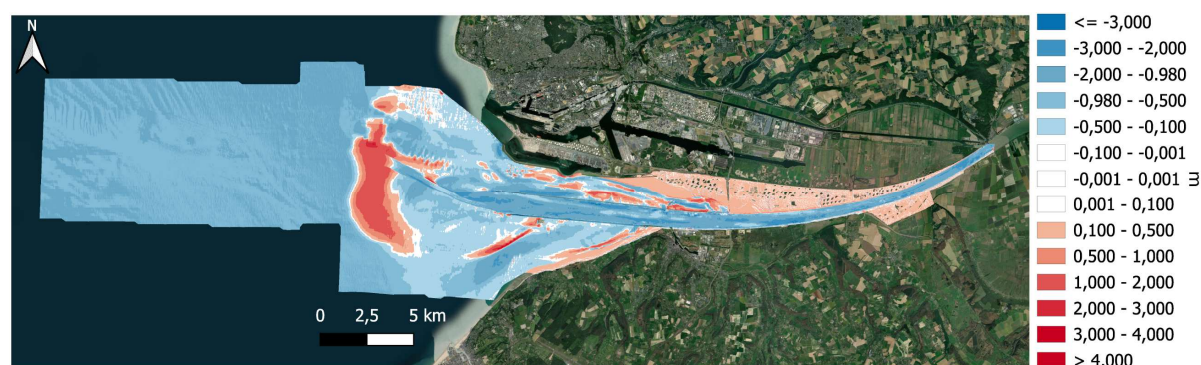


Figure 22 : Evolution topo-bathymétrique (niveau marin + 1 m) pour le scénario 2100 "évolution différenciée", par rapport à la topo-bathymétrie de 2022.

2. Critères de validation

La profondeur moyenne des domaines « chenal » et « large » obtenue en 2100 est cohérente avec les hypothèses fixées, avec une érosion de 45 cm environ dans le chenal principal (plus profond d'environ 1m45 en 2100) et le domaine « large » plus profond d'environ 5 cm. En revanche, l'évolution du secteur des fosses (plus profond de 40 cm) est moins facile à appréhender via cet indicateur, car la zone est composée de bancs supposés suivre la montée du niveau marin et de chenaux, qui à l'inverse, s'érodent. De plus, la sédimentation sur les bancs est limitée par la cote des digues submersibles sur lesquelles ils prennent place.

Tableau 5 : Comparaison des profondeurs moyennes entre le scénario 2100 "évolution différenciée" et 2022, pour chaque secteur bathymétrique de l'embouchure (polygones définis Figure 6).

Profondeur moyenne (m cmh)	2022	2100 Évolution différenciée	2100 Évolution différenciée (élévation niveau marin + 1 m)
Polygone chenal	-5.2	-5.67	-6.67
Polygone fosses	-0.5	0.10	-0.90
Polygone large	-3.41	-2.46	-3.46
Polygone ouest	-15.47	-15.47	-16.47

Les évolutions mises en place pour ce scénario modifient plus significativement les pentes que les deux autres scénarios. C'est notamment le cas à la jonction entre les domaines « chenal » et « large » (Figure 23). Cependant, cette augmentation de la pente de 4° à l'actuel à 7° dans ce scénario (Figure 14) est inévitable étant donné que l'on souhaite rehausser les bancs sédimentaires d'Amfard et du Ratier, et

éroder le chenal principal (Figure 17). A l'exception de la limite entre bancs et chenaux, il n'y a pas d'évolution significative des pentes en comparaison du contexte actuel.



Figure 23 : Inclinaison du terrain en degrés pour le scénario "évolution différenciée".

Sur la période 2022-2100, dans le cas du scénario « évolution différenciée » le bilan sédimentaire est positif, avec un taux de sédimentation de 7.13 mm/an et 8.29 mm/an en incluant les modifications du périmètre 2 (Tableau 6). Dans le périmètre 1, les chenaux sont en érosion, alors que l'ensemble du périmètre 2 est en accrétion, ce qui explique cette différence de taux de sédimentation d'environ 1 mm/an. Le volume total de sédiment déposé dans ce scénario ($\sim 1.10^8 \text{ m}^3$) est inférieur à l'évolution de l'espace d'accommodation généré par la montée du niveau marin ($1.52.10^8 \text{ m}^3$). Ce qui est cohérent avec les hypothèses étant donné que les bancs sont supposés suivre la montée du niveau marin et que les chenaux sont en érosion. En revanche, il est difficile de comparer l'ampleur des modifications morphologiques (i.e. de la couche sédimentaire) aux informations sur le remplissage de l'embouchure (PSES, Pellen et al., 2025, Figure 5), car une seule période suffisamment longue présente un taux de remplissage similaire : 1960-2021 (61 ans) avec environ $1.25.10^8 \text{ m}^3$ déposés (incluant une période érosive de 1999 à 2021). Néanmoins, un taux de sédimentation de 7 à 8 mm/an semble, à dire d'expert, cohérent pour l'embouchure de l'estuaire de Seine.

Tableau 6 : Volume sédimentaire déposé ou érodé entre 2022 et 2100 et taux de sédimentation annuel associé pour le scénario "évolution différenciée". Le calcul a été effectué sur le périmètre 1 et sur l'ensemble du domaine modifié (zone ouest exclue dans les deux cas).

2100 Evolution différenciée	Volume (m^3)	Taux de sédimentation (m/an)
Périmètre 1	$7.13.10^7$	$7.13.10^{-3}$
Ensemble du domaine modifié	$9.86.10^7$	$8.29.10^{-3}$

CONCLUSION

Trois contextes topo-bathymétriques contrastés ont été mis en place, afin de tester la sensibilité de l'hydrodynamique estuarienne à l'évolution du niveau marin et de la morphologie des fonds de l'embouchure (i.e. l'évolution de la hauteur de la colonne d'eau par rapport au niveau des plus basses marées). Cette méthodologie ne prenant pas directement en compte les interactions hydro-morpho-sédimentaires, les trajectoires d'évolution ciblées ont été définies avec un groupe de travail constitué d'experts de l'estuaire de Seine et les scénarios ont été validés en se basant sur les connaissances disponibles du remplissage passé et futur de l'embouchure (e.g. Pellen et al., 2025 ; Grasso et al., 2021). Les trois critères de validations principaux sont : 1. la profondeur moyenne en 2100 des différents domaines de l'embouchure ; 2. les volumes et taux de sédimentations générés par les modifications ; 3. l'inclinaison du terrain. Cette étape de validation a permis de montrer une très bonne cohérence entre les données disponibles et les résultats des modifications pour chacun des trois scénarios qui sont : 1. « augmentation topo-bathymétrique » ; 2. « réduction topo-bathymétrique » ; 3. « évolution différenciée ». Cependant, plusieurs limites liées à la méthodologie mise en place sont importantes à considérer. Premièrement, cette démarche étant réalisée à l'échelle globale de l'embouchure de la Seine, il n'est pas pertinent d'interpréter les évolutions à des échelles spatiales trop fines (i.e. à l'échelle des objets sédimentaires maximum comme les bancs ou les chenaux). De plus, la base des modifications repose sur des différentiels topo-bathymétriques qui témoignent principalement d'évolution verticale. Seules les évolutions horizontales principales, telles que l'avancée des bancs d'Amfard et du Ratier vers l'ouest, ont été mises en place via des méthodologies alternatives. Enfin, bien qu'il soit considéré dans les objectifs des scénarios des évolutions des conditions hydrodynamiques et d'apport sédimentaire, il n'a pas de relation directe entre hydrodynamique et érosion/dépôt dans cette méthodologie. Le seul moyen de prendre en compte les processus HMS serait des modélisations numériques basées sur les processus, ce qui dans le cas de simulations prospectives long-termes (78 ans) implique de très nombreuses incertitudes liées à l'évolution des forçages, des apports et stocks sédimentaires et même la représentation numérique des processus. Ce projet permet donc de fournir des contextes plausibles et contrastés d'évolution topo-bathymétriques de l'embouchure qui permettront d'étudier dès maintenant l'impact des évolutions de la couche sédimentaire et du niveau marin sur l'hydrodynamique estuarienne.

BIBLIOGRAPHIE

ARTELIA, 2019. Définition des périodes de retour des forçages et des niveaux de pleines mers en estuaire de Seine pour la gestion du risque inondation. Rapport réalisé pour le GIP Seine-Aval et la DREAL Normandie, 99p.

ARTELIA, 2021. Modélisation des inondations en estuaire de la Seine : dynamique et emprise des inondations. Phase 2 : Modélisation des scénarios. Rapport réalisé pour le GIP Seine-Aval. 70 pp.

Delsinne, N., 2005. Evolution pluri-millénaire à pluri-annuelle du prisme sédimentaire d'embouchure de la Seine. Facteurs de contrôle naturels et d'origine anthropique. Caen, 179+14 pp.

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

Laborie V., 2024. Projet ATLANTIS - note technique - Prise en compte de l'élévation du niveau moyen de la mer en baie de Seine – état de l'art et recommandations. Projet Seine-Aval 7, 28 p.

Lemoine JP, 2021. Dynamique morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine : Rôle des dragages d'entretien. Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale. 242p.

Pellen R., Tessier B., Lesourd S., 2024. Prisme Sédimentaire de l'Estuaire de la Seine. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 7, 49 pp.



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

Olivier M. G., L'Ebrelec E., 2025. **Projet CRONSTIBATH : Construction de scénarios d'évolution théorique des bathymétries de l'estuaire de la Seine.** Rapport de recherche réalisé par le GIP Seine-Aval, 34 p.

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

www.seine-aval.fr

gipsa@seine-aval.fr

Le GIP Seine-Aval est financé par

