



## **Le prisme sédimentaire de l'estuaire de la Seine** *Etat des connaissances géologiques*

*Romain Pellen, Bernadette Tessier, Sandric Lesourd*



# RESUME EXECUTIF

L'étude des possibles trajectoires d'évolution futures de l'estuaire de la Seine, se heurte au problème de la définition précise des épaisseurs de sédiments qui sont potentiellement remobilisables, dans le domaine de l'embouchure notamment. En particulier il convient de mieux localiser les « points durs », constitués par des zones hautes du substratum ou par les nappes et cordons de galets. Dans cet objectif, une campagne de carottages longs pourrait être envisagée afin de reconstituer le plus précisément possible la nature des sédiments qui composent le prisme sédimentaire d'embouchure, et définir la profondeur de son substrat non remobilisable sous l'action des conditions hydrodynamiques actuelles.

Dans la perspective de cette campagne de carottage, un état des lieux précis des données déjà disponibles à l'embouchure a été réalisé et constitue l'objectif principal du projet PSES. Ce rapport présente cet état des lieux et apporte des renseignements sur 1) l'épaisseur du prisme sédimentaire disposé sur le substrat non remobilisable ; 2) la nature et la chronologie de ce prisme de remplissage ; 3) sur sa mobilité depuis le début du 19<sup>e</sup> siècle. Ces avancées nous permettent d'identifier les secteurs clés où les informations ne sont pas suffisantes pour établir une cartographie précise à l'échelle de l'embouchure renseignant sur la profondeur du toit du substrat non remobilisable.

# SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPES AU PROJET

**UMR-6143 Laboratoire M2C Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière, Université Caen Normandie**

- Romain Pellen
- Bernadette Tessier
- Sandric Lesourd

Coordination scientifique : Bernadette Tessier

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le GIP Seine-Aval ainsi que les partenaires du projet PSES, dont HAROPA, pour m'avoir fourni les données et guidés à travers les méandres des connaissances de la Seine. Merci également à Nicolas Bacq et Jean-Philippe Lemoine pour les conseils et également l'organisation des 20 ans du GIP Seine-Aval qui m'ont permis de voir la grande diversité et la richesse des travaux menés le long de l'estuaire de la Seine. Je tiens également à remercier les collègues du laboratoire M2C pour l'accueil et la bienveillance dont vous avez fait preuve, et surtout à l'équipe des thésards et techniciens pour tous les bons moments de partages. Merci à Marie-Pierre, Hélène et l'équipe financière de l'université de Caen, notamment pour m'avoir aidé dans le dédale administratif des missions. Je terminerai par un grand merci à Bernadette et Sandric pour m'avoir guidé avec patience sur la voie de la Seine, de la sédimentologie et de la Normandie. Promis, je ne dirais plus que le Mont Saint Michel est d'origine bretonne !

# SOMMAIRE

<b>L'ESTUAIRE DE LA SEINE, UN ESPACE OUVERT SUR LA MANCHE</b>	
I.	Rappel du contexte scientifique général du projet ..... 5
II.	La Seine et son estuaire, un environnement ouvert sur la Manche ..... 6
1.	Présentation physiographique de la zone..... 6
2.	Présentation des conditions météorologiques ..... 7
3.	Présentation des conditions de marée et de salinité..... 8
III.	Données utilisées et approches ..... 9
1.	Les données sismiques ..... 10
2.	Les données de carottage et forage..... 12
3.	Les données bathymétriques ..... 12
4.	Approches scientifiques ..... 14
a.	Interprétation des données sismiques ..... 14
b.	Compilation des données de bathymétrie et prélèvements sédimentaires ..... 15
<b>10 000 ANS D'HISTOIRE DE LA SEINE</b>	
I.	La morphologie du substratum ..... 17
1.	A l'échelle de la Baie de Seine ..... 17
2.	A l'échelle de l'embouchure de la Seine ..... 19
II.	Architecture interne du prisme sédimentaire..... 20
1.	A l'échelle de la Baie de Seine ..... 20
2.	A l'échelle de l'embouchure de la Seine ..... 21
III.	Résumé des connaissances stratigraphiques et les facteurs de contrôle sur le remplissage sédimentaire à l'embouchure de la Seine..... 29
1.	Rôle de la remontée du niveau marin depuis le dernier maximum glaciaire ..... 30
a.	Le prisme de bas niveau marin et de transgression marine ..... 30
b.	L'inondation marine de la vallée incisée..... 30
c.	Le cortège de haut niveau..... 30
2.	Rôle des changements climatiques..... 31
<b>L'EMBOUCHURE DE LA SEINE FACE A L'ANTHROPISATION</b>	
I.	Evolution morpho-sédimentaire de l'estuaire depuis 1834..... 33
1.	De l'estuaire sauvage à l'estuaire construit ..... 33
a.	Evolution de la morphologie de l'estuaire en fonction des aménagements anthropiques 33
b.	Evolution des environnements supratidaux, intertidaux et subtidaux depuis 1834 ..... 35
c.	La vasière Nord ..... 36
2.	Evolution de la couverture sédimentaire ..... 37
II.	Quantification du comblement estuarien entre 1834 et 2021 ..... 40
1.	Evolution du volume sédimentaire général depuis 1834..... 40
2.	Répartition des volumes sédimentaires érodés et en dépôt ..... 41
a.	De 1834 à 1913 ..... 42
b.	De 1913 à 1960 ..... 42
c.	De 1960 à 2021 ..... 42
III.	Etat des lieux des connaissances de la couverture sédimentaire actuelle. .... 43
<b>CONCLUSION</b>	
1.	Conclusion : résumé des principaux résultats..... 45
2.	Perspectives ..... 45



# L'ESTUAIRE DE LA SEINE, UN ESPACE OUVERT SUR LA MANCHE

## I. Rappel du contexte scientifique général du projet

Les systèmes estuariens, comme celui de la Seine, sont des milieux dynamiques sensibles aux variations climatiques et aux variations du niveau marin relatives associées. Dans le contexte actuel de réchauffement global, marqué entre autres par une accélération de la remontée du niveau marin, des modifications majeures sont attendues tant sur le plan du fonctionnement morpho-sédimentaire des estuaires.

Comme la plupart des estuaires dans le monde, l'estuaire de la Seine subit des forçages anthropiques, se surimposant aux forçages naturels. Fournir des clés pour mieux prévoir les futures évolutions et concevoir des solutions d'aménagements constitue à l'heure actuelle l'enjeu scientifique majeur des recherches menées sur les environnements estuariens.

Dans ce contexte, de nombreuses équipes ont concentré leurs travaux depuis plusieurs dizaines d'années sur les facteurs qui ont contrôlé le remplissage sédimentaire des estuaires au cours de la dernière remontée du niveau marin, la transgression holocène, c'est-à-dire depuis 9000 ans environ. Dans l'estuaire de la Seine, ces travaux sont menés depuis près de 50 ans dans le cadre de plusieurs projets, dont certains soutenus par le programme Seine-Aval. Ces études ont été réalisées séparément à différentes échelles de temps et d'espace : depuis la baie de Seine jusqu'à la zone externe de l'estuaire et sa zone amont. En mer, les dernières données récoltées en 2003 ont depuis été impactées par l'évolution morpho-sédimentaire rapide de l'embouchure estuarienne. Ainsi, la compilation de l'ensemble des données géophysiques, géologiques et paléo-bathymétriques propose une mise à niveau de la morphologie générale du fond inaffouillable de l'estuaire de la Seine, dont une partie de l'embouchure reste inconnue. La compilation et le traitement des données paléo-bathymétriques menés par Nicolas Delsinne (2005) ont également été complétés au regard des données bathymétriques acquises au cours des vingt dernières années, permettant de faire une mise à jour des informations sédimentaires (carte de nature du fond, carottage) aujourd'hui préservées.

## II. La Seine et son estuaire, un environnement ouvert sur la Manche

### 1. Présentation physiographique de la zone

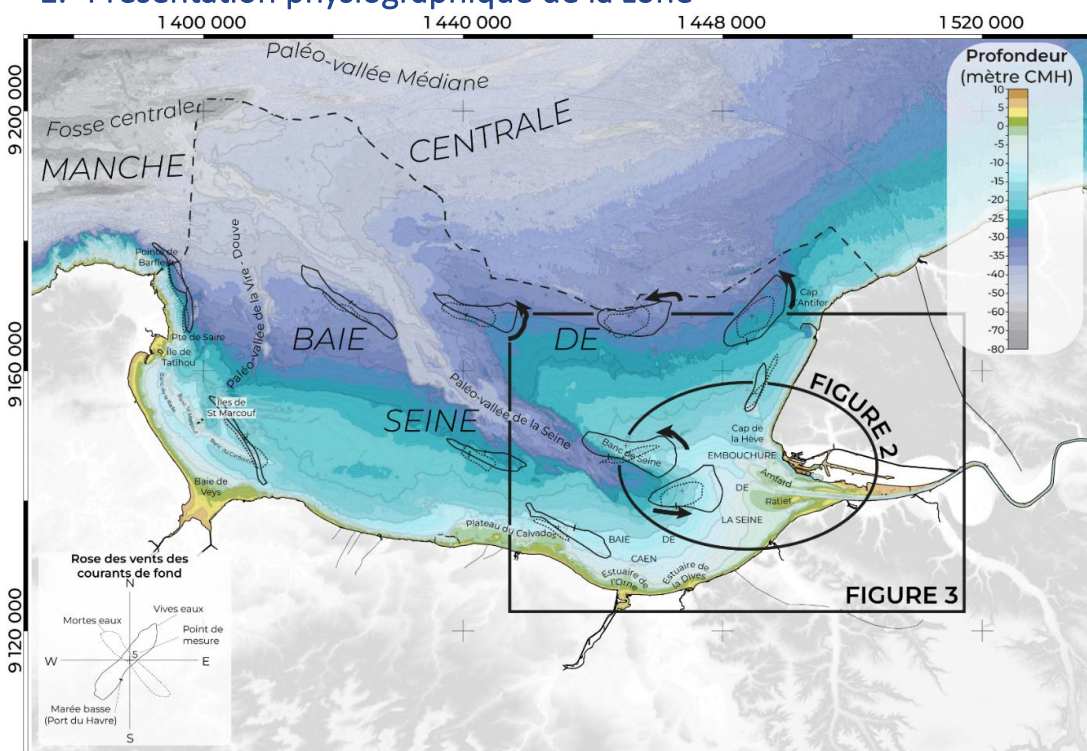


Figure 1: Carte bathymétrique de la Baie de Seine (grille bathymétrique de 2021 fusionnée avec la grille bathymétrique de 2016 du plateau continental de l'hexagone (Source : SHOM). Rose des courants de fond en Baie de Seine issue de Le Hir et L'Yavanc, 1985).

La Seine est un fleuve majeur se connectant à la Manche, dont l'embouchure marque la partie occidentale de la Baie de Seine (Figure 1). Sa longueur (780 km) et son aire de drainage (78 650 km<sup>2</sup>) en fait le quatrième fleuve nord-ouest européen derrière le Rhin, l'Elbe et la Loire. L'embouchure de la Seine s'ouvre sur une baie peu profonde (< 45m) plongeant progressivement vers la partie centrale de la Manche avec une profondeur de 45 à 50 m. Les fonds de la Baie de Seine, tout comme la Manche, Centrale et Orientale, sont incisés par un réseau de paléo-vallées (Paléo-vallée de la Seine, la Vire, le fleuve Manche) et de dépressions (Figure 1), héritées des bas niveaux marins du quaternaire et de l'histoire tectonique régionale. La morphologie et le tracé dépendent entre autres de la nature géologique du substratum (pour plus de détail, lire Benabdellouahed et al., 2014 ; Paquet et al., 2023).

La morphologie actuelle de l'estuaire externe de la Seine est en forme d'entonnoir et se caractérise par deux barres longitudinales bien développées, le banc d'Amfard au nord, le banc du ratier au sud, pouvant atteindre 6 à 8 m de hauteur et 5 à 10 km de longueur (par rapport au -2m CMH<sup>1</sup>) (Figure 2). Les barres, portées par des digues, sont séparées depuis la bordure nord vers la bordure sud de l'estuaire respectivement par : la fosse Nord, l'engainement permettant un accès vers les ports de Honfleur et de Rouen, la fosse Sud. Les activités de dragage (Lemoine, 2021) dans le passé et encore aujourd'hui ont conduit au développement des dépôts de clapage du Kannik (abandonné en 2016), du Macchu et d'Octeville.

<sup>1</sup> Cote Marine du Havre

## 2. Présentation des conditions météorologiques

Le climat du bassin versant de la Seine est de type océanique tempéré avec une pluviométrie moyenne de 750 mm/an dont 2/3 sont transférés dans l'atmosphère par le phénomène d'évapotranspiration. Le reste rejoint l'estuaire soit rapidement par la surface soit sur des temps plus longs via les nappes souterraines, dont le contexte hydrogéologique du bassin versant (massif crayeux karstifié) pointe l'importance notable de ces apports (Dupont et al., 2006 ; Massei et Fritier, 2010 ; dans Lemoine et al., 2015). Le régime hydrologique est caractérisé par un régime pluvial océanique avec un débit maximal en hiver quand les pluies sont abondantes et que le processus d'évapotranspiration est faible et inversement en été (Figure 2 ; extrait de Chapalain, 2019). Au barrage de Poses, les mesures moyennes du débit fluvial s'établissent à 450 m<sup>3</sup>/s sur la période 1941-2013. Les pics de crues sont

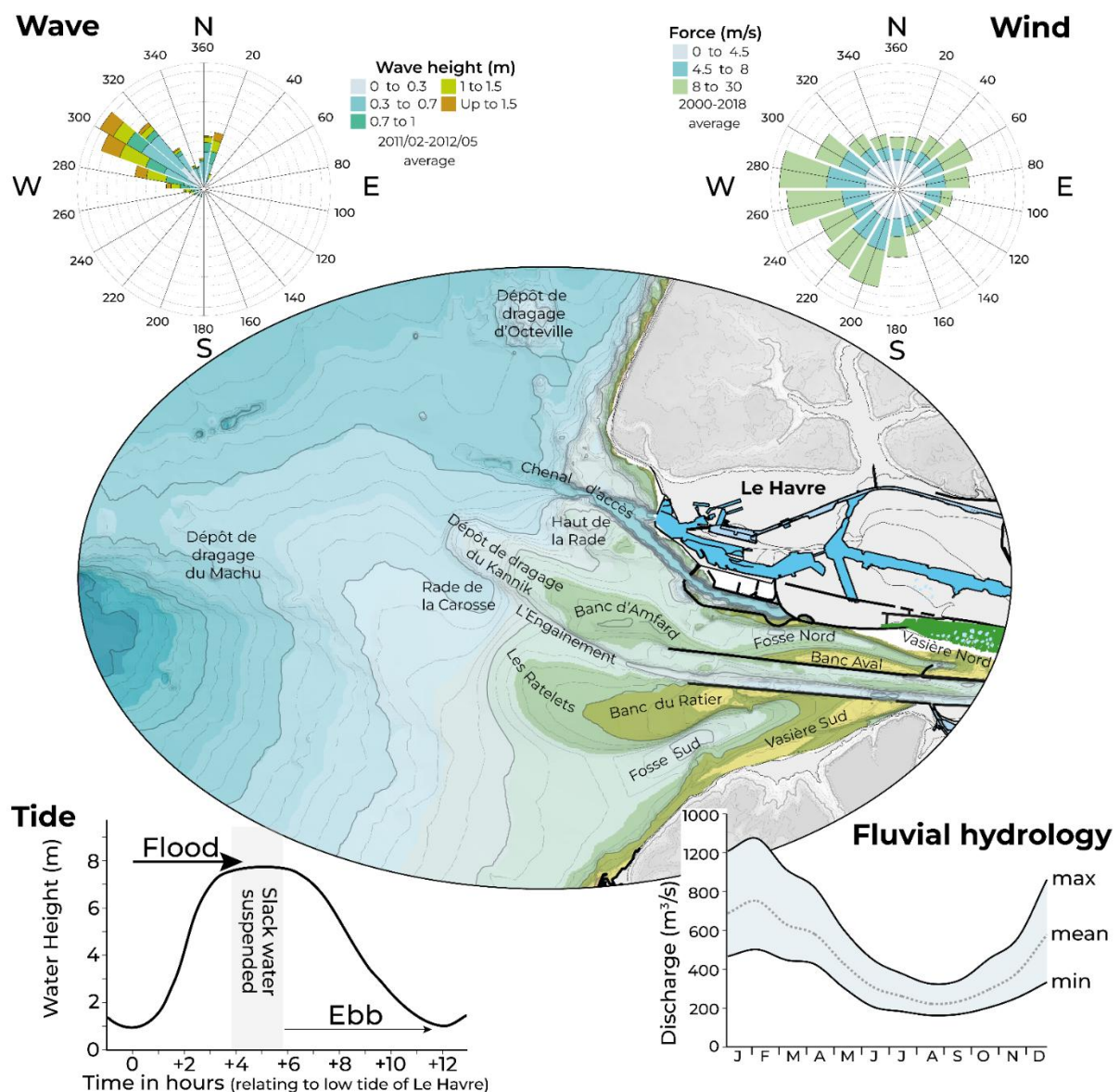


Figure 2 : Zoom sur l'embouchure de l'estuaire de la Seine avec les différents domaines morphologiques cités dans ce document. A haut à gauche : Rose des vagues à l'embouchure de l'estuaire calculée à partir des données de la bouée Metzinger entre février 2011 et Mai 2012 (Données Candhis CETMEF) (d'après Lemoine et al., 2015). A haut à droite : Rose des vents simulée à 10m sur la période 2000-2018 pour le point latitude (48.75°N ; 1.2°W). A bas à gauche : Evolution simplifiée de l'amplitude de marée au Havre (Delsinne, 2005) ; En bas à droite : Evolution du débit de la Seine moyenné sur 1an (Source : GIPS-Aval).

rencontrés entre janvier et avril (autour de 1400 m<sup>3</sup>/s et jusqu'à 2200 m<sup>3</sup>/s de manière exceptionnelle) (Lemoine et al., 2015). A l'étiage, un débit moyen de 140 m<sup>3</sup>/s est observé, atteignant même un débit de 40 m<sup>3</sup>/s pour les années particulièrement sèches (Chapalain, 2019).

En baie de Seine, les vents dominants affectant la partie marine ouverte de l'estuaire viennent de l'ouest et du sud-ouest (Figure 2). Ils reflètent l'intensification de l'activité des tempêtes pendant la période hivernale. Les vagues, principalement orientées au nord-ouest, présentent une période de 6-7 s avec une hauteur significative décennale maximale (Hs) d'environ 0.8 à 1.5 m (Raout, 1996 ; Lemoine et al., 2015).

### 3. Présentation des conditions de marée et de salinité

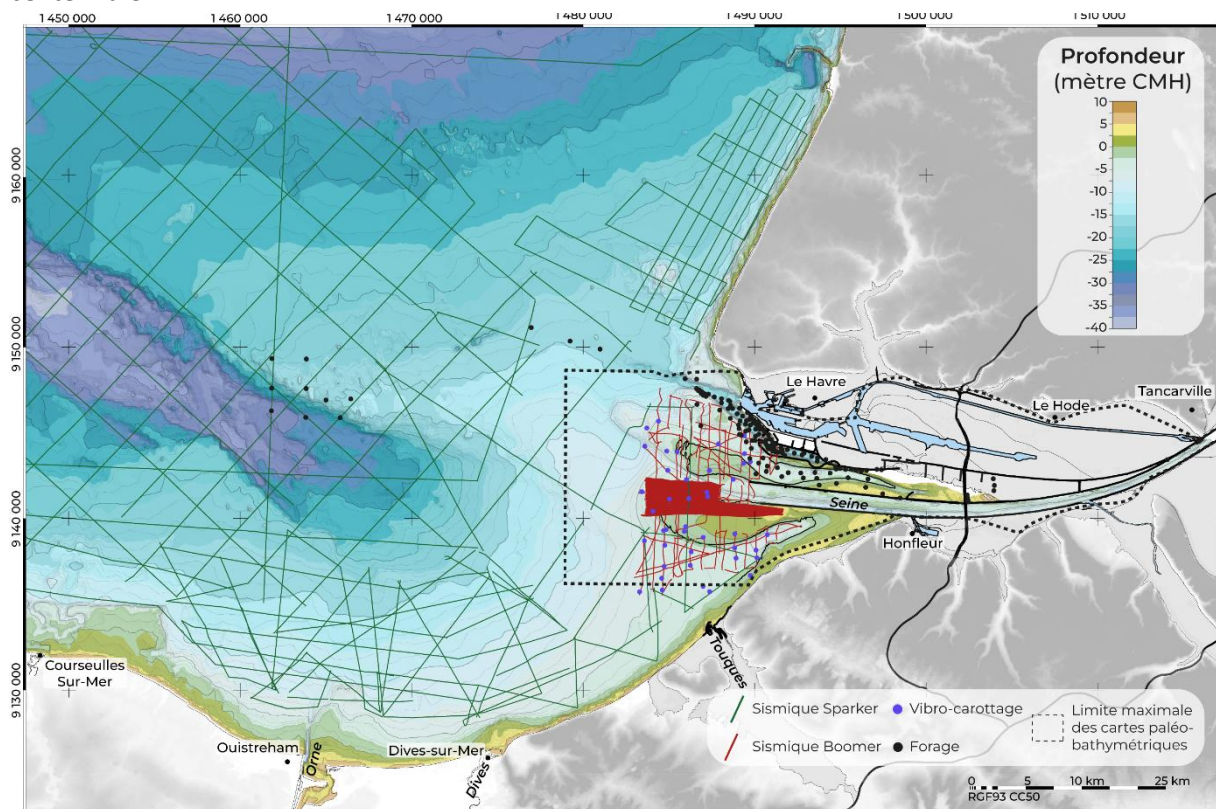
L'estuaire de la Seine est un milieu macrotidal semi-diurne avec un marnage maximal d'environ 8 m au Havre. Ce marnage s'explique par la morphologie de la Baie de Seine, dont la diminution des profondeurs canalise l'onde de marée et son énergie, ce qui a pour conséquence d'augmenter le marnage (Lemoine et al., 2015). La situation latitudinale de la Baie de Seine, sa situation géographique par rapport à la Manche et l'Atlantique (d'où provient l'onde de marée) et la réverbération des ondes principales et secondaires en Manche, favorisent une accélération du flot ainsi qu'une tenue du plein (i.e. double pleine mer), particulièrement visible en vives-eaux (plus d'explication dans Lemoine et al., 2015) (Figure 2). Entre l'embouchure de l'estuaire et le barrage de Poses, du fait également de la morphologie en entonnoir de l'estuaire, une atténuation de l'amplitude de marée vers l'amont est observée (pour une amplitude de 7m en vive eaux à l'embouchure, une amplitude d'un mètre est notée à Poses (170 km en amont)). Durant la propagation de l'onde de marée vers l'amont, cette dernière est modifiée par la morphologie des fonds, la rencontre avec les eaux douces de l'amont, mais aussi par les courants tidaux, en particulier par le courant de jusant de la marée précédente (dans Lemoine et al., 2015). Ces deux observations induisent un courant de flot plus court (4-5 heures) et généralement plus rapide, comparé à un jusant plus long (7-8 heures) et plus lent (Figure 2c ; plus de détail dans Lemoine, 2015). Le transport sédimentaire pendant le flot vers l'estuaire est d'ailleurs supérieur au transport vers la baie pendant le jusant (Rieb, 1999). Dans la zone des barres et des chenaux, les chenaux marginaux sont dominés par le flot tandis que le chenal central est dominé par le jusant.

A l'échelle de la Baie de Seine, une valeur de salinité inférieure à 35 PSU peut être observée en période de crue fluviale, avec une baisse graduelle vers l'embouchure de la Seine avec des taux jusqu'à 15 PSU et de manière locale au niveau des différents fleuves côtiers de la Baie de Seine (Données CNEXO-COBELGMM, d'après IFREMER, dans Dubrulle-Brunaud (2007)). A l'embouchure, la rencontre entre les masses d'eau douce et d'eau salée est à l'origine d'une zone de mélange appelée gradient de salinité. A l'échelle annuelle, la distribution de la salinité dépend des conditions hydrodynamiques à l'embouchure de l'estuaire. La limite de dessalure des eaux peut descendre vers l'aval en période de crue et d'autant plus en période de vives eaux et à l'inverse peut remonter en amont en période d'étiage (Chapalain, 2019). La différence de salinité et, donc de densité, entre les eaux fluviales et les eaux marines est responsable d'une stratification verticale, qui s'accompagne d'une accumulation et d'un piégeage des matières sédimentaires et organiques provoquant une zone où la turbidité est maximale (bouchon vaseux). L'apport de sédiments par la Seine est estimé à environ 0,5 10<sup>6</sup> t/an de silt et d'argile en suspension qui atteignent l'estuaire inférieur et la baie de Seine (Avoine et al. 1981 ; Avoine, 1986 ; Lesourd, 2000 ; Delsinne, 2005 ; Lesourd et al., 2016).



### III. Données utilisées et approches

L'ensemble des données disponibles est représenté en **figure 3**. Cela inclut les données sismiques et de vibro-carottage de l'UMR M2C CNRS-Université de Caen-Normandie, les données de forage fournies par HAROPA ainsi que les données bathymétriques historique issues du travail de compilation de Nicolas Delsinne (2005), et du GIP Seine-Aval. Dans cette partie, nous présentons les méthodes d'acquisitions des différentes données ainsi que les méthodes d'exploitations. L'étude de l'architecture interne du prisme sédimentaire holocène est réalisée au moyen de données de sismique réflexion de très haute résolution (THR), calibrées en termes de faciès sédimentaires par des vibrocarottages (2 à 6 m) et forages (5 à 35 m). Le croisement des différentes informations nous permet d'aborder l'histoire des sédiments de l'embouchure de la Seine selon deux échelles de temps : pluri-millénaire et centennale.



*Figure 3: Illustration des données disponibles pour le projet PSES. En vert et rouge sont présentées les données sismiques acquises par Sparker ou Boomer. Les points noirs et violets correspondent respectivement aux carottages et forages carottés longs, (essentiellement prélevés le long du port du Havre entre 1963 et 2019,) et vibro-carottier à des vibro-carottes (acquises lors des campagnes Vastedeba 3 en 2001 et CaroSeine en 2003). Les pointillés noirs soulignent l'extension maximale des 34 grilles paléo-bathymétriques représentant l'évolution de la morphologie de l'estuaire entre 1834 et 2021 (Source HAROPA Le Havre ; Delsinne, 2005).*

## 1. Les données sismiques

De nombreuses prospections sismique en Baie de Seine ont été réalisées (sismique Sparker, Auffret et Alduc 1977; Alduc, 1979; Auffret, Alduc *et al.* 1980a; Auffret *et al.* 1980; Auffret et d'Ozouville 1985; Benabdellouahed *et al.*, 2013, 2014; Tessier, 2002; ) mais leurs couvertures sont limitées à l'est par le méridien du Havre (Figures 3, 4), et n'abordent qu'une petite partie du prisme sédimentaire. La mission Géoseine II (Tessier, 2002 ; Delsinne, 2005 ; Tessier *et al.*, 2012) complète cette couverture à travers les barres et chenaux d'embouchure, grâce à l'acquisition de 85 profils sismiques Boomer pour une longueur totale de 130km (Figures 3, 4).

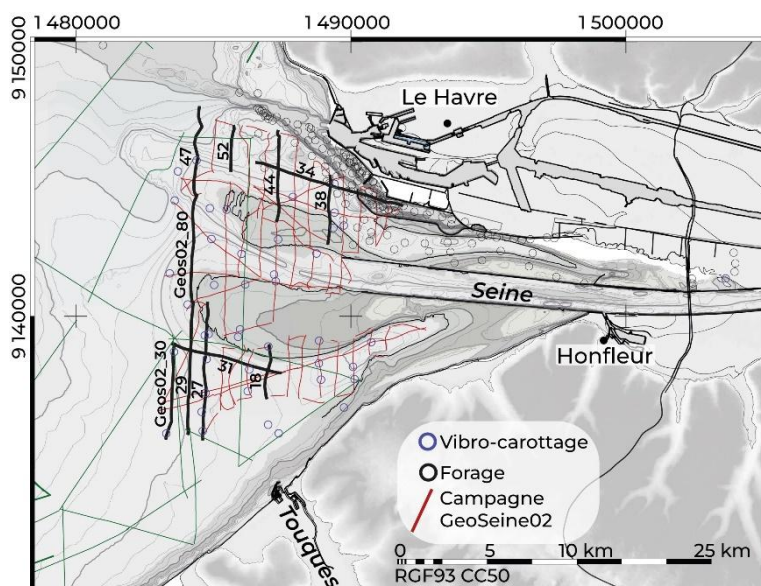


Figure 4 : Plan de position de la campagne sismique GeoSeine02 (<https://doi.org/10.17600/2410010>). Les données ont été acquises avec un boomer. Les profils sismiques surlignés en gras correspondent aux lignes présentées dans ce rapport

Après acquisition, l'échelle verticale sur les enregistrements bruts est exprimée en milli-seconde temps double, car elle représente le temps aller-retour de chaque onde, dont le point de réflexion correspond à un réflecteur sismique. Pour pouvoir obtenir l'épaisseur réelle en mètres, il faut connaître la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans les différents types de sédiments. Cette vitesse dépend de la densité et de l'état de compaction des matériaux. Dans la plupart des cas, pour des sédiments sableux meubles saturés en eau, une loi de vitesse de 1600-1700 m/s est choisie (Tableau 1) ; cependant, des essais de sismique réfraction réalisés par FUGRO ont montré des vitesses plus élevées pouvant atteindre 2200 m/s dans les sédiments les plus grossiers (Delsinne, 2005).

Vitesse sismique (m/s)	Formation
1480 – 1600 m/s	Sables silteux ou argileux "vasards", sables pouvant être graveleux – état non compact
1600 – 1800 m/s	Sables moyennement denses à assez denses, pouvant contenir graviers et galets, graviers avec galets possibles à l'état plus ou moins lâche.
1800 – 2000 m/s	Sables et sables graveleux denses, graviers avec éventuellement galets
2000 – 2200 m/s	Graviers avec galets plus denses

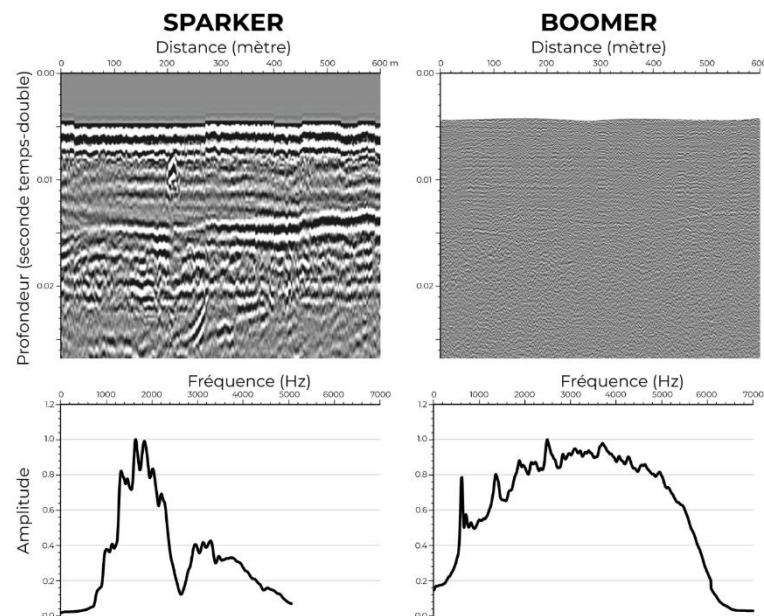
Tableau 1: Vitesses de propagation des ondes sismiques suivant la nature sédimentaire pour l'Estuaire de la Seine (Delsinne, 2005).

Pour cette étude, étant donné le caractère principalement sableux des faciès carottés, une vitesse de conversion temps-profondeur des profils sismiques de 1700m/s est adoptée. Ainsi sur chaque profil, l'échelle verticale est exprimée en mètres, rapportée au 0 CMH (Cote Marine au Havre). Lors du retraitement des données, il a été impossible d'effectuer la correction de marée, cette information n'ayant pas été enregistrée dans les données sismiques brutes. L'ancienneté des données ne permet pas un traitement *a posteriori*. Un décalage vertical peut donc être observé entre différents profils.

## Encart N°1 – Principe d'acquisition des données sismiques

La sismique en milieu peu profond a pour objet d'étude des sédiments dont les contrastes acoustiques peuvent être faibles face aux bruits amplifiés par la faible tranche d'eau. En Baie de Seine et au niveau de l'embouchure de la Seine, 2 sources sismiques ont été utilisées pour produire une onde sonore qui parcourra plusieurs couches géologiques sous le fond marin avant d'être réfléchi puis enregistrée via un récepteur (une série d'hydrophones). La source Sparker est équipée d'électrodes immergées dans l'eau et dans lesquelles est envoyée une décharge de 4000 volts 2 fois par seconde. L'arc électrique vaporise l'eau, provoquant la formation de bulles de gaz dont l'implosion induit une onde acoustique. Les gammes de fréquence varient entre 500-1500 kHz pour le sparker SIG 50 J utilisé en Seine. La résolution verticale optimale est d'environ 0,5 m. Le sparker et la flûte sont séparés latéralement d'environ 5 m et placés à 50 m, derrière le bateau, ce dernier navigant à une vitesse moyenne de 4 nœuds (Benabdellouahed, 2011). La source Boomer (employée pour la campagne GeoSeine02) fonctionne

sur le principe de la déformation d'une plaque métallique sous l'action d'une décharge de 4000 volts et ce toutes les 1/2 secondes. Cette déformation génère une onde acoustique. Les gammes de fréquence sont 1-10 kHz. La résolution verticale optimale est d'environ 0,25 mètre. La pénétration du signal peut atteindre 100 m dans les argiles et jusqu'à 20 m dans des sédiments sableux. Le boomer est tracté à 15 m derrière le bateau à une vitesse de 3 nœuds.



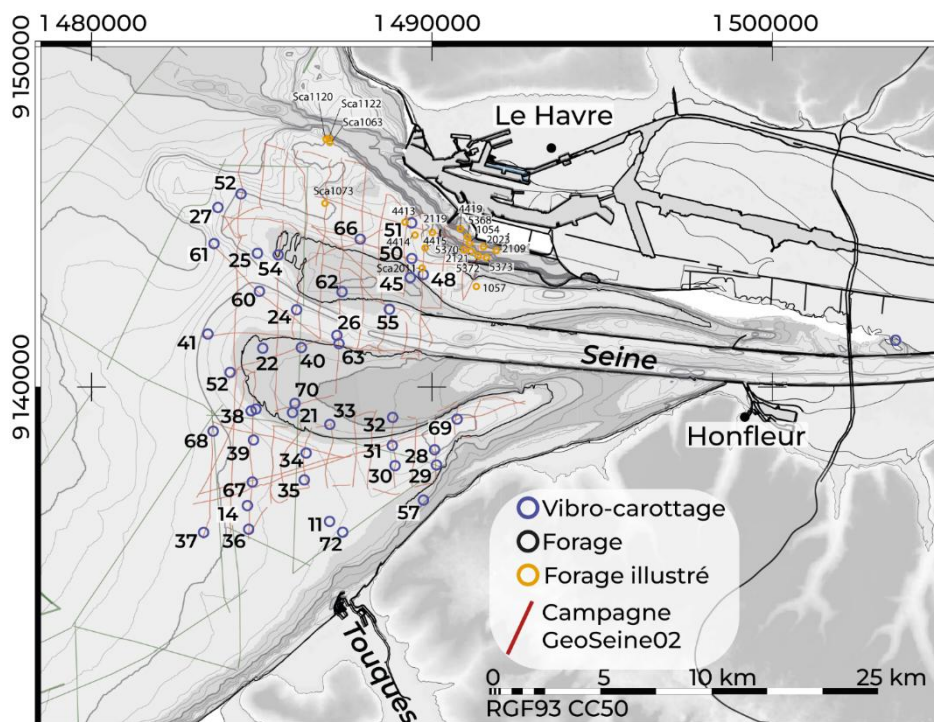
Encart n°1 : Comparaison de résolution entre une sismique Sparker et une sismique Boomer, et des spectres de fréquences.



## 2. Les données de carottage et forage

Deux missions de carottages plurimétriques ont été réalisées à l'embouchure de l'estuaire : Vastedebea III (<https://doi.org/10.17600/1070040>) en 2001 et Caroseine (<https://doi.org/10.17600/3070150>) en 2003 (N/O Thalia/Ifremer, collaboration DEL-Ifremer Brest). La première mission était consacrée à l'étude des sédiments holocènes de la Baie (Garnaud *et al.* 2003). La seconde mission a permis d'obtenir 43 carottes de 2 à 4 m de longueur (Annexe 1). Elles se répartissent pour la plupart le long des profils sismiques de la campagne sismique Géoseine II (Figure 3), afin de corréliser faciès acoustiques et faciès sédimentaires. En raison du développement portuaire depuis 1960, plusieurs campagnes de forage ont été également réalisées ((P.A.H. 1973; Seers-Foralo 1995; Fugro 1999, 2005, 2010, 2016), totalisant 158 forages (Annexe 1). La nomenclature employée sur les figures est « Vk » pour les vibrocarottages et « F » pour les forages.

Suite aux campagnes de carottage, des analyses de faciès sédimentaires (7 faciès sédimentaires identifiés), de calcimétrie (passées coquillères et sables coquilliers) et de granulométrie (calibration des faciès de sables moyens, fins et vase) ont été réalisées. Des datations radiocarbone complètent ces analyses.



## 3. Les données bathymétriques

En raison de l'activité portuaire, des données bathymétriques de haute qualité sont disponibles pour la zone d'étude depuis 1834. Les cartes bathymétriques de 1834 à 1936 ont été extraites de la base de données du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). Les informations bathymétriques (raster) de ces cartes peuvent être numérisées et l'analyse des données ainsi capturées permet de quantifier les changements morphologiques. Les cartes sont géoréférencées en utilisant un minimum de six points invariables afin d'être le plus précis possible (Crowell *et al.*, 1991), et numérisées à partir des cartes originales à l'aide du logiciel Didger©. Les données bathymétriques de 1960 à 2021 ont été extraites des bases numériques des ports du Havre et Rouen. Enfin, le jeu total de données bathymétriques comporte vingt cartes paléo-bathymétriques pour la partie aval de

l'estuaire, toutes calibrées au niveau 0 CMH. Elles ont été réalisées à un intervalle relativement régulier de 20 ans. Cependant, le jeu de données est assez hétérogène en termes de surface cartographiée (Tableau 2). Afin d'effectuer une cartographie générale des épaisseurs sédimentaires remobilisées (c'est-à-dire mises en jeu au cours des changements morphologiques), les cartes bathymétriques de 2021 et 1834 ont été prolongées vers la Baie de Seine en utilisant les données de cartographie générale de la Manche de 2016.

Année	Echelle	niveau 0 de référence	Système de coordonnées	Zone cartographiée (simplifiée)	Types d'informations	Nombre de fichier	Source
1834	1/15000	4m829	Toises	Estuaire	minute de sonde	2	Archive-SHOM
1834	1/45000	4m829	Toises	Estuaire	minute de sonde / bathymétrie simplifiée	2	idem
1853	1/15000	idem	Toises	Estuaire	minute de sonde	1	idem
1855	1/45000	idem	Degrés / méridien de Paris	Estuaire	Carte présentant la forme et position des bancs de l'embouchure	1	idem
1866	1/15000	idem	Toises	Estuaire	minute de sonde	4	idem
1866	1/45000	idem	Degrés / méridien de Paris	Estuaire	bathymétrie simplifiée	1	idem
1869	1/15000	idem	Toises	Estuaire	minute de sonde	1	idem
1875	1/45000	idem	Degré / méridien de Paris	Estuaire	bathymétrie simplifiée	1	idem
1879	1/45000	idem	Degré / méridien de Paris	Estuaire	bathymétrie simplifiée	1	idem
1880	1/15000	idem	Toises	Estuaire	minute de sonde	4	idem
1880	1/45000	idem	Degré / méridien de Paris	Estuaire	bathymétrie simplifiée	1	idem
1883	1/15000	idem	Toises	Estuaire	minute de sonde	1	idem
1894	1/15000	idem	Toises	Estuaire	minute de sonde	10	idem
1909	1/45000	idem	Degré / méridien de Paris	Estuaire	Carte (Volmat, 1925)	1	idem
1913	1/15000	idem	Toises	Estuaire	minute de sonde	4	idem
1913	1 / 9750m	idem	Toises	Estuaire	Bancs d'Amfard et du Ratier, forages	1	idem
1913	1/40000	4m835	Carroyage kilométrique	Estuaire	Carte bathymétrique de synthèse / tracé 1m isobathe	1	Archives et levées du Port de Rouen
1929	1/40000	idem	idem	Estuaire	idem	1	idem
1936	1/40000	idem	idem	Estuaire	idem	1	idem
1942	1/40000	idem	idem	Estuaire	idem	1	idem
1958	1/40000	4m710	idem	Estuaire	idem	1	idem
1959	1/40000	idem	idem	Estuaire	idem	1	idem
1960-1985	1/2000m	idem	Lambert I	Estuaire étendu	Levés papier équidistance 0,5m digitalisés	1	idem
1985-2003	1/2000m	idem	lambert I	Estuaire étendu	Levés acquis numériquement puis moyennés sur grille de 100*100m	1	idem
2009-2021	1/200m	idem	lambert I	Baie de Seine	Levés acquis numériquement puis moyennés sur grille de 10*10m	1	Archives et levées du Port du Havre

Tableau 2: (Page précédente) Liste simplifiée des cartes disponibles aux archives du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (entre 1834 et 1913) et des données numériques aux ports du Havre et de Rouen.

La plus grande zone commune couverte sur toutes les cartes, définie comme la « zone de l'estuaire » (Figure 2) s'étend de la rivière Risle pour la frontière orientale (limite amont), jusqu'au Havre pour la frontière occidentale (limite aval). A partir de 1960, la limite ouest des cartes atteint la zone du Kannik (Tableau 2 : Estuaire étendu). Enfin, à trois reprises, la partie orientale de la baie de Seine a également été prospectée et cartographiée, c'est la "zone de la baie".

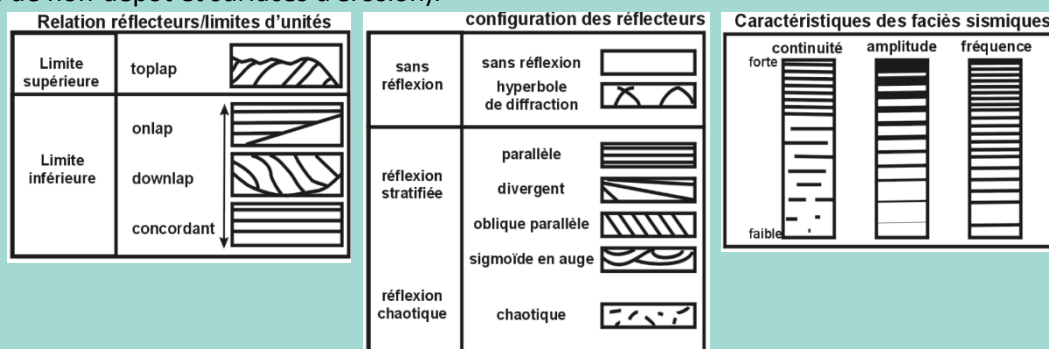
## 4. Approches scientifiques

### a. Interprétation des données sismiques

L'analyse des profils sismiques repose sur la détermination de faciès sismiques, suivant différents paramètres caractérisant la configuration des réflexions (Mitchum *et al.* 1977). Ces paramètres sont la continuité, l'amplitude, la fréquence (Encart 2). Les faciès sismiques constituent des unités, limitées au toit et à la base par des discordances ou par leur prolongement en concordance (Encart 2). L'unité sismique constitue l'élément principal de l'étude en stratigraphie sismique. L'interprétation vise, dans un premier temps, à reconnaître et à définir les entités sédimentaires dans leur environnement de mise en place. L'étape suivante est de replacer ces ensembles sédimentaires dans un contexte chronologique. La synthèse de ces données repose sur les travaux de Benabdellouahed (2011) Benabdellouahed et al. (2014) et Delsinne (2005) pour la cartographie du socle, sur Delsinne (2005) et Tessier et al. (2010, 2012) pour la stratigraphie du remplissage et l'évolution sédimentaire Holocène.

## Encart N°2 – Méthode d'interprétation sismique

L'identification d'une unité sismique, ou séquence de dépôt, se fonde sur l'analyse de la géométrie des réflecteurs, limitée à la base et au sommet par des discordances auxquelles se réfère la description des caractéristiques géophysiques internes. Ces caractéristiques dépendent du type d'acquisition employé (puissance de la source, fréquence, modalité du traitement sismique) ainsi que du traitement. La figure ENCART01 présente deux acquisitions sismiques Sparker et Boomer dans l'estuaire de la Seine, situées au même endroit et calibrées à la même échelle. L'identification d'une séquence de dépôt se fonde sur le principe de la stratigraphie sismique (Figure encart 02). Sur une section sismique, elle consiste en une succession conforme de réflecteurs sismiques (même continuité, fréquence, amplitude et géométrie similaire). Aux limites de séquence, ces terminaisons peuvent être de différentes natures et sont classées en trois catégories (terminaisons discordantes ou concordantes ; hiatus de non-dépôt et surfaces d'érosion).

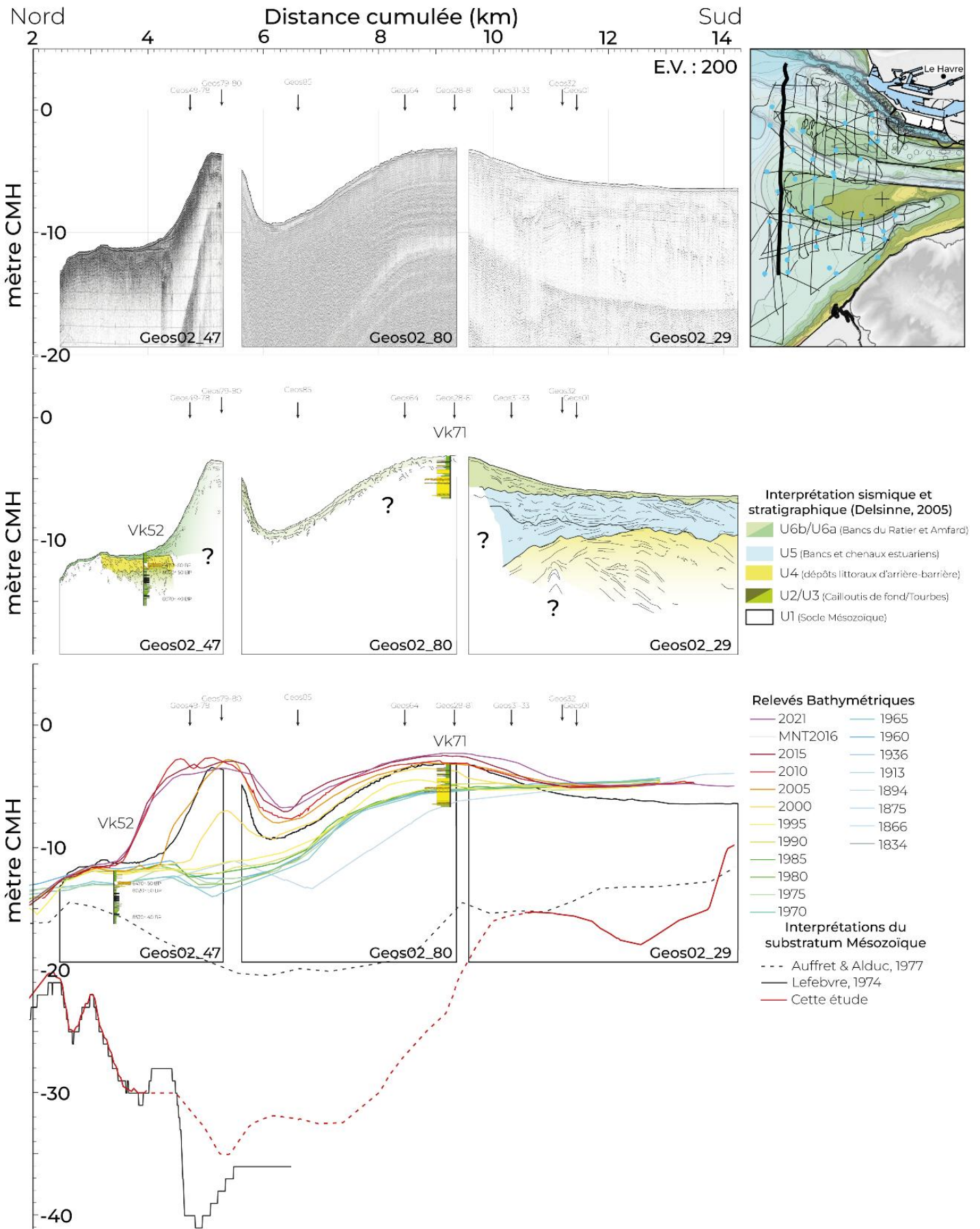


## b. Compilation des données de bathymétrie et prélèvements sédimentaires

Afin d'illustrer au mieux l'ensemble des données sismiques, bathymétriques et de forages, l'ensemble des données est présenté suivant des profils Nord-Sud ou Ouest-Est, en englobant l'ensemble de l'embouchure de l'estuaire (Exemple [Figure 6](#)). Concernant les données bathymétriques et de forage, nous avons compilé deux séries de profils orientées Sud-Nord et Ouest-Est. La longueur des forages et carottes sédimentaires Vk (Campagne CaroSeine en 2003) et Vb (Campagne Vastedeba en 2002) est indiquée, ainsi que les faciès sédimentaires des carottes Vk. Le pas d'échantillonnage pour les profils Sud-Nord est de 1 km entre les points Pk 373 et Pk 355, il passe à 500m entre Pk371 et Pk366 (Cf [Annexe 2](#)). Un dernier profil Sud-Nord au point Pk 352 est également illustré pour présenter le carottage effectué dans le chenal environnemental en 2011 (Tessier et al., 2011).

*Figure 6: (Page suivante) Présentation de la compilation des différentes données mises à disposition pour le projet PSES. En haut, les profils sismiques de la campagne GeoSeine02 ont été convertis en mètre (pour la profondeur) et exportés du logiciel Delph, et leur profondeur a été convertie en mètres (CMH). La figure centrale présente l'interprétation de ces données suivant les principes de la stratigraphie sismique. La pénétration des ondes sismiques dans la partie centrale de l'embouchure est rapidement atténuée (masque acoustique lié à la présence de gaz – biométhane produit par la dégradation de la matière organique présente dans des niveaux sédimentaires dans la partie basale du remplissage, ou à des niveaux de sables sur-compactés proches de la surface). La partie superficielle est cependant imagée grâce à la compilation des données bathymétriques disponibles depuis 1834. Des datations faites sur certaines données de carottage sont également illustrées. Deux interprétations du fond inaffouillable (i.e. le socle Mésozoïque) sont également disponibles pour l'embouchure. Dans ce travail, une révision de ces deux interprétations précédentes concernant la profondeur du socle (Auffret & Alduc, 1977 ; Lefebvre et al., 1974) a conduit à la proposition d'une 3<sup>ème</sup> interprétation du substratum Mésozoïque, basée sur les interprétations précédentes, les données de forages ainsi que les interprétations sismiques.*



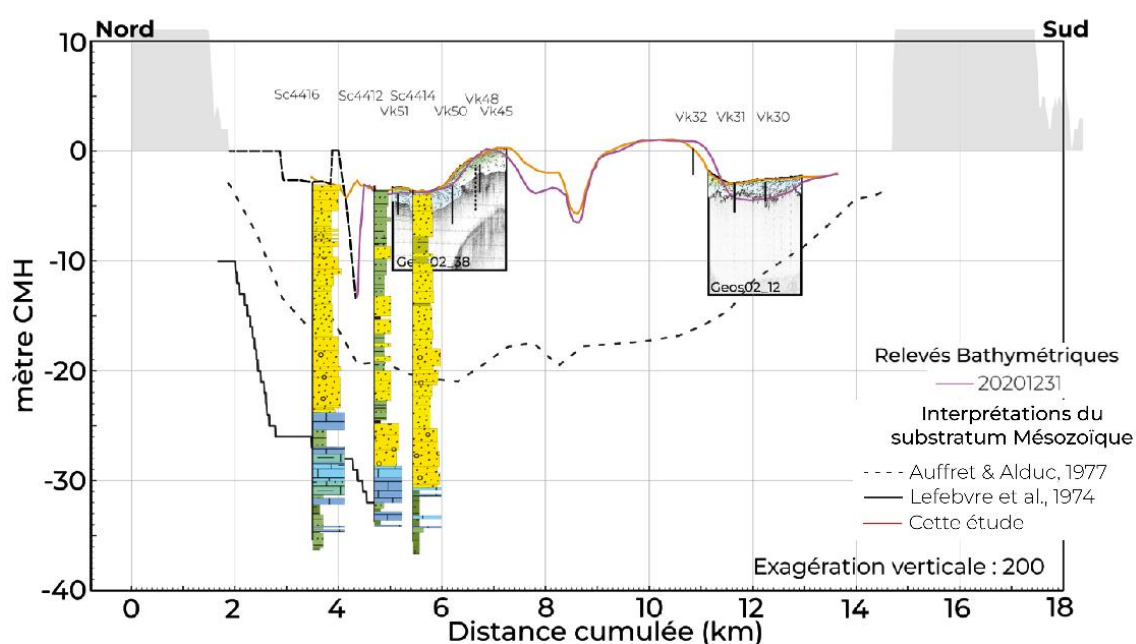


# 10 000 ANS D'HISTOIRE DE LA SEINE

## I. La morphologie du substratum

### 1. A l'échelle de la Baie de Seine

La [figure 7](#) présente un exemple de compilation de données de forage, de géophysique ainsi que les deux interprétations disponibles ([Auffret & Alduc, 1977](#) ; [Lefebvre et al., 1974](#)) pour la base du substratum Mésozoïque. L'interprétation de Lefebvre et al. (1974) est basée sur la compilation des données de forages du Port du Havre, tandis que celle d'Auffret & Alduc résulte de l'interprétation de sismique réflexion à l'échelle de la Baie de Seine ([Auffret & Alduc, 1977](#) ; [Alduc, 1979](#), [Auffret et al., 1980a, b](#)).



*Figure 7: Compilation des données géologiques et géophysiques, ainsi que des interprétations du socle mésozoïque proposées à l'embouchure de la Seine.*

Depuis, ces données de sismique réflexion ont été complétées via la thèse de Benabdellouahed ([2011](#)) et fournissent une cartographie générale de la nature et la morphologie du socle mésozoïque en Baie de Seine ([Benabdellouahed et al., 2014](#) ; [Paquet et al., 2023](#)). Dans le cadre du projet PSES, nous avons joint les interprétations de Benabdellouahed ([2011](#)) avec celle de Lefebvre ([1974](#)), corrigées par les nouvelles données de forage ainsi que les interprétations sismiques de Delsinne ([2005](#)), lorsque le socle Mésozoïque était visible (surtout au niveau des bordures nord et sud de l'embouchure). La [figure 8](#) illustre ce travail de compilation à l'échelle de la Baie de Seine, sans toutefois aller jusqu'aux fosses du Cotentin, au nord de la pointe de Barfleur.

Suivant un axe SO-NE, la dépression correspond à la partie NO de la paléovallée de la Seine, enfouie aux abords du Havre sous les bancs de Seine et les sédiments du complexe estuarien (Figure 8 ; Delsinne, 2005). Elle s'est développée en incisant le substratum calcaire d'âge principalement Jurassique. La paléovallée rejoint un système général de vallées incisées qui draine la Manche du NE au SO et dont l'origine au cours des temps géologiques est globalement connue depuis longtemps mais qui a fait l'objet récemment d'une discussion synthétique sur la base des données sismiques acquises ces dernières années dont celles de la thèse de Benabdellouahed, 2011 (Paquet et al., 2023). Concernant l'incision de la baie de Seine, ses flancs montrent une hauteur de 20 à 40m, différenciant deux plateaux présentant un léger pendage vers le large (Figure 8). La profondeur de la vallée oscille entre -25 et -40m CMH à l'embouchure de la Seine et évolue jusqu'à -75m CMH au large de Barfleur. L'incision est continue, centrée sur l'embouchure de la Seine, avec des axes chenalisés plus ou moins sinueux et auxquelles se connectent les affluents de la Vire, la Seules, l'Orne et la Dive. Étudiée en détail par Alduc (1979), Benabdellouahed (2011), Benabdellouahed et al. (2013) et Paquet et al. (2023), son développement est lié aux oscillations glacio-eustatiques Pleistocènes amenant à une succession de périodes d'incision et de comblement sédimentaire, dont certains dépôts issus des anciennes glaciations ont été préservés le long de l'incision (Benabdellouahed et al., 2013). Les sédiments préservés dans l'embouchure de la Seine n'auraient pas plus de 20 000 ans. Leurs dépôts correspondent à la période de déglaciation entre le dernier LGM (Last Glacial Maximum ; ~20 000 ans) et l'actuel, où le niveau marin serait monté de plus de 120 m en quelques milliers d'années.

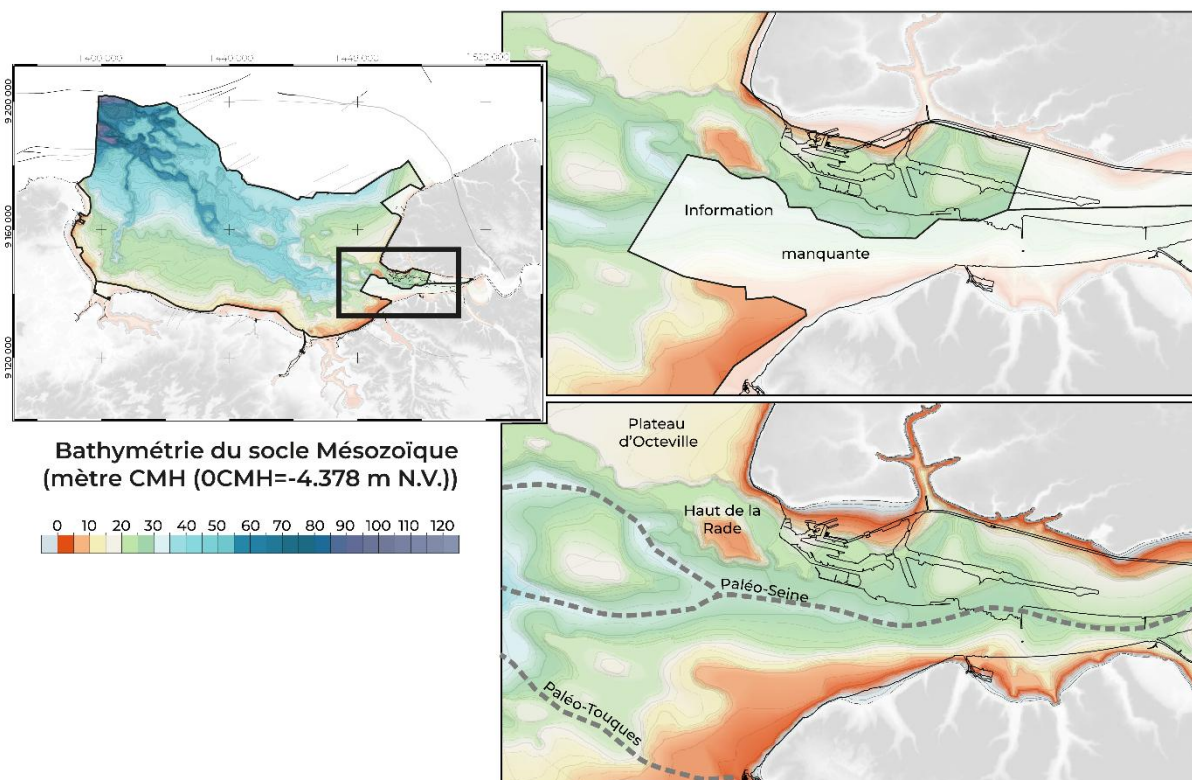


Figure 8: Morphologie et profondeur du substratum Mésozoïque à l'échelle de la Baie de Seine (en haut à gauche), puis à l'embouchure de l'estuaire de la Seine (à droite). Le cache blanc représente la zone où nous n'avons pas d'information géologique ou géophysique sur la profondeur du socle Mésozoïque. L'interpolation proposée est une hypothèse possible de la morphologie du socle, mais non vérifiée aujourd'hui.



## 2. A l'échelle de l'embouchure de la Seine

La morphologie du socle Mésozoïque à l'embouchure de l'estuaire est en partie connue, notamment la partie nord via l'exploitation des données de forage le long du port du Havre (Lefebvre, 1974 ; Delsinne, 2005). Les données de sismique imagent le socle au niveau des bordures nord et sud de l'estuaire, mais la présence d'un masque acoustique dans la partie centrale empêche la cartographie du substratum (Figures 6, 8b). Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce masque acoustique sous le premier mètre de sédimentation : la présence de niveaux sableux sur-compactés voire indurés (par exemple sous la surface des bancs, cf. Figure 11, profil Geos64) et/ou la remontée de gaz d'origine biogénique produit en profondeur à partir des formations sédimentaires Holocènes riches en matière organique (par exemple sur le profil Geos30, figure 11). La différence du toit du substratum entre les deux interprétations semble résulter d'une différence d'approche de données entre Lefebvre (1974) - issue d'un travail de synthèse de forage - et Auffret et Alduc (1977), dont la cartographie du socle fut basée sur la synthèse à l'échelle de la Manche de 3000 km de ligne sismique. Pour ces derniers, l'embouchure de l'estuaire de la Seine constitue également la terminaison de leur modèle.

Dans le cadre de PSES, nous avons repris les données de forage, de sismique, puis les interprétations de Lefebvre (1974) au niveau de l'estuaire de la Seine. Vers l'ouest de l'embouchure, nous avons repris les interprétations de Lefebvre (1974), que nous avons corrélé aux interprétations de Benabdellouahed (2011) et à celles d'Elise Grenard-Grand (Thèse M2C Caen, 2019-2021, non aboutie, données Mission Stockline2019, <https://doi.org/10.17600/18000945>). Au niveau de l'embouchure, les données de forage indiquent une profondeur de substratum maximale de 32,5 m dans l'axe de la paléo-Seine. Nous avons prolongé cette profondeur vers l'ouest dans l'axe de la paléo-Seine, entre les Hauts de la Rade et le Haut du Ratier (Figure 8b), bien qu'un masque acoustique ne permette pas de vérifier cette hypothèse. Vers l'amont, nous n'avons plus d'information vis-à-vis de la morphologie du substratum. Dans ce modèle, nous avons cependant supposé une prolongation de l'incision, mais ce tracé hypothétique est assujéti à caution. A l'embouchure de l'estuaire, sur sa rive gauche, nous avons repris les interprétations d'Auffret et Alduc (1977). La paléo-Seine reçoit les cours d'eau bas-normands (Touques, Dives et Orne) qui se concentrent à l'Ouest en une vaste zone de confluence. Les sédiments remplissent actuellement complètement ce réseau de paléovallées.

## II. Architecture interne du prisme sédimentaire

### 1. A l'échelle de la Baie de Seine

La différence entre le substratum Mésozoïque et la bathymétrie actuelle des dépôts sédimentaires en Baie de Seine (Figure 9) témoigne d'importants dépôts préservés dans l'axe de la paléo-vallée de la Seine, à la jonction entre les dépressions de la Manche et la paléo-vallée en baie de Seine, et dans une moindre mesure, dans l'axe de la paléo-vallée de la Vire, et dans l'embouchure de l'estuaire de la Seine.

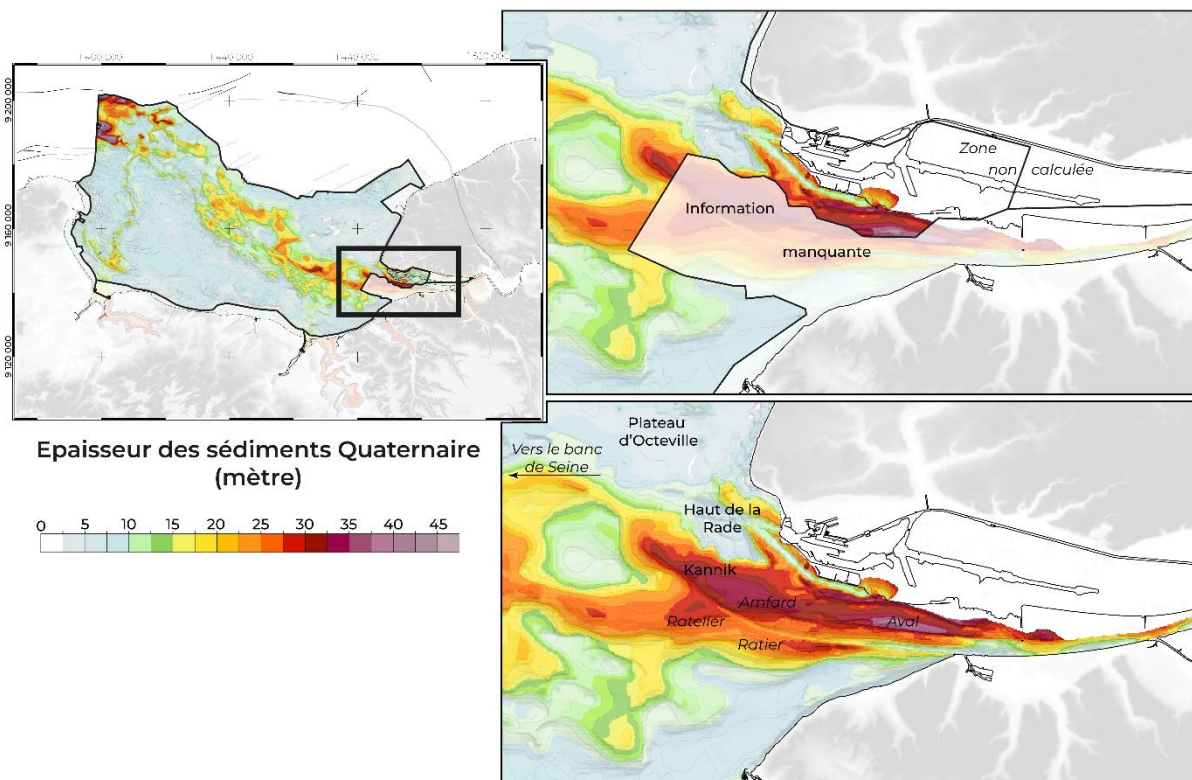


Figure 9: Epaisseur des dépôts Pléistocènes (en mètres) à l'échelle de la Baie de Seine (en haut à gauche) puis au niveau de l'embouchure de l'estuaire de la Seine (différentiel Socle Mésozoïque-Bathymétrie 2021). Le masque blanc illustre la zone où l'épaisseur des dépôts est inconnue en raison des masques acoustiques dans les données sismiques et de manque de sondages longs dans cette partie de l'estuaire. L'estimation de l'épaisseur est dérivée de l'hypothèse de cartographie du socle Mésozoïque (Figure 8).

La sismique révèle la présence de deux nappes principales étagées en Baie de Seine (Auffret et Alduc, 1977 ; Benabdellouahed, 2011 ; Benabdellouahed et al., 2013). Ces nappes sont observées en remplissage des paléovallées creusées dans le substratum Mésozoïque et attribuées à des dépôts fluviatiles grossiers mis en place en période de bas niveau marin. Le matériau principal est le silex sous la forme de galets ou cailloutis. Sur la base des nouvelles données sismiques THR acquises à la fin des années 2000, Benabdellouahed (2011) et Benabdellouahed et al. (2013), attribuent un âge plutôt Weischélien (Wurm) et Saalien (100-300 000 ans BP) respectivement à ces deux nappes principales. Une troisième, supposé d'âge pré-Saalien, très mal préservée, est également identifiée.

Le Banc de Seine représente aussi une zone de dépôt maximum (ou dépôcentre) localisé (Figure 9). Ce dernier est interprété comme la dernière phase de morphogenèse sous-marine (Larsonneur, 1971). Ce banc sableux holocène occupe une position en bordure de l'incision. La direction de son allongement est celle des courants de marée (Auffret *et al.* 1980a). Sa mise en place doit remonter à -7000 ans BP (Alduc, 1979). Le Banc de Seine jalonne un ancien rivage sous forme d'une flèche littorale édifiée à l'embouchure de l'estuaire (Auffret *et al.* 1980a; 1980b). La meilleure preuve est peut-être la présence de lentille de sédiments grossiers au sein de ce banc (Delsinne, 2005).

## 2. A l'échelle de l'embouchure de la Seine

Au niveau de l'embouchure, la puissance maximale des dépôts atteint 40 à 45m, au niveau des bancs d'Amfard et de la fosse sud (Figure 9). L'étude de l'architecture interne du prisme sédimentaire a été réalisée par Delsinne (2005) et Tessier *et al.* (2010, 2012). Des travaux annexes se sont intéressés plus en détail à l'évolution paléo-environnementale de la région (Michel, 1968 ; Delibrias, 1971 ; Ters, 1973 ; Huault, 1974 ; Lefebvre, 1974 ; Huault et Lefebvre, 1984 ; Lefebvre, 1991 ; Garnaud, 2003 ; Frouin *et al.*, 2010 ; Sorrel *et al.*, 2012), en lien avec la remontée du niveau marin et la variabilité climatique au cours de l'Holocène.

Cette partie s'intéresse plus spécifiquement à l'organisation de l'architecture sédimentaire de l'estuaire de la Seine. En ce sens, 12 faciès sismiques répartis en 8 unités sismiques avaient été identifiées (Delsinne, 2005), résumés en 6 unités sismiques dans Tessier *et al.* (2010, 2012) et reportés figures 10 et 11. La figure 10 résume les faciès ainsi que les unités sismiques illustrés dans ce travail, ainsi que leurs âges et leurs paléo-environnements associés. Ces faciès sismiques sont présentés figure 11, ainsi que les deux types de masques acoustiques (décrits précédemment), associés soit à la présence de gaz ou de niveaux sableux compactés empêchant la propagation du signal en profondeur.

Unités	Caractéristiques					Surface	Interprétations		
	Faciès	Continuité	Amplitude	Fréquence	Géométrie		Age	Nature sédimentaire	Environnement
<b>U1</b>	f1 f2	forte à moyenne -	-	moyenne -	oblique parallèle transparente		Mésozoïque	Carbonate / Argile	Plateforme carbonatée / milieu sub-tropical
<i>S1</i>						Polyphasé érosive	la + récente: ~10 000 ans BP		
<b>U2</b>	f3	chaotique à transparente	moyenne à transparente	moyenne à absente	chaotique à transparent			grave de fond	fond de rivière / Terrasse
<i>S2</i>						Discordance	~8500 ans BP		
<b>U3</b>	f4	moyenne à faible	forte à moyenne	faible	oblique parallèle à plane irrég.			tourbes & vases à hydrobies / sable à glauconie verte	estuarien à marin
<i>S3</i>						Erosive	~8020 ans BP		
<b>U4</b>	f5	forte à faible	moyenne à faible	forte à moyenne	oblique divergent à plane irrég.			séd. vaso-sableux à glauconie verte	dépôts littoraux arrière-barrière
<i>S4</i>						Ero. chenalisé	~2040 ans BP (Sud) à 605 ans BP (Nord)		
<b>U5</b>	f6	moyenne à faible	forte à moyenne	faible	oblique parallèle à plane irrég.			Altern. sablo-vaseuse sable coquillers compact	bancs et chenaux estuariens
<i>S5</i>						Concordante	sub-actuel		
<b>U6</b>	f7	moyenne à faible		faible	oblique parallèle à divergent			sable moyens parfois coquillers	dynamique actuelle / dépôts dragage
	f8	moyenne à faible		faible	plane moulante				

Figure 10: Résumé des faciès, surface et unités sismiques identifiés dans le remplissage sédimentaire à l'embouchure de la Seine (Delsinne, 2005 ; Tessier *et al.*, 2010), des surfaces et unités sismiques identifiées ainsi que les âges alloués. Au total 5 unités sismiques sont résumées et décrites dans le remplissage. L'unité U1 correspond au substratum sur lequel repose le remplissage.



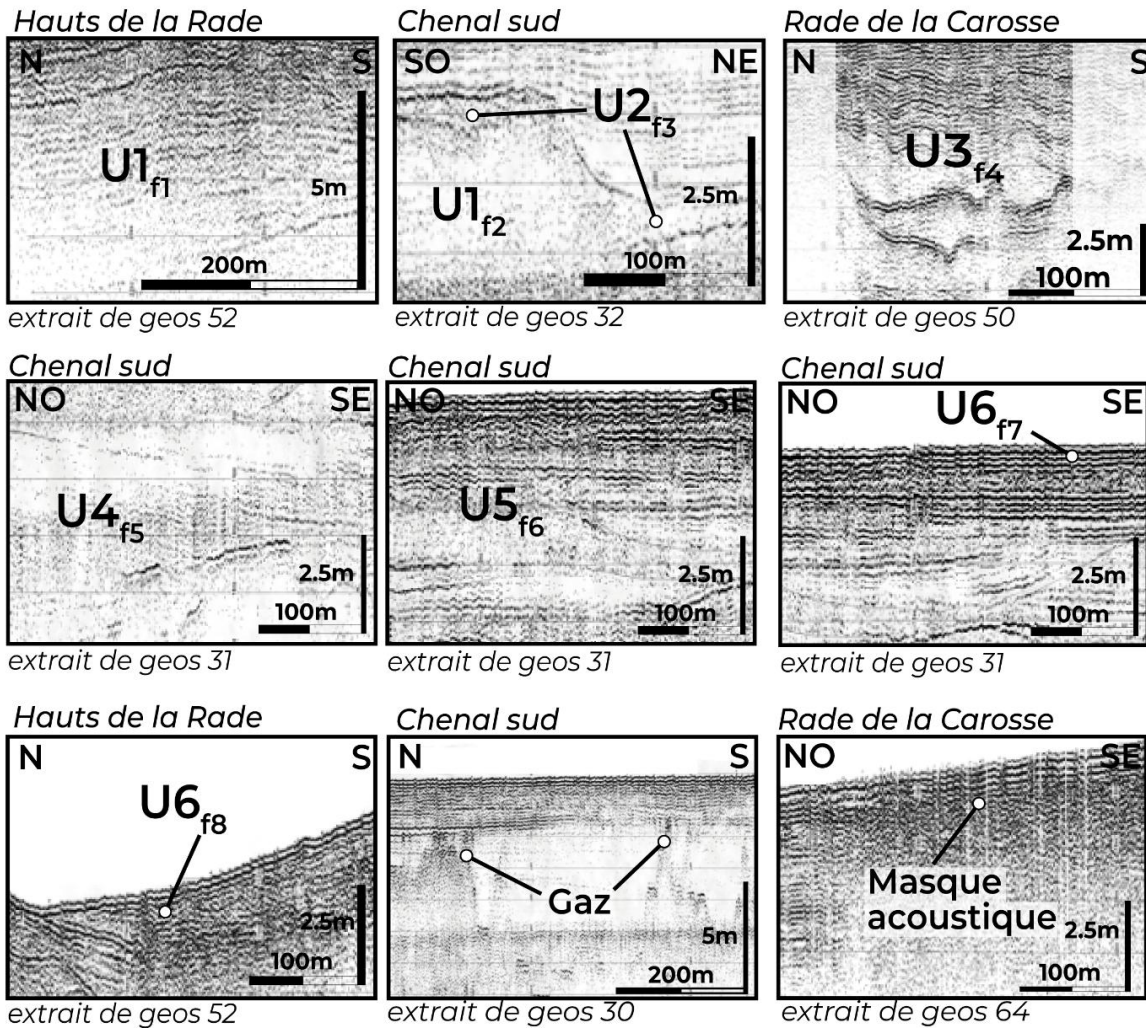


Figure 11: Illustration des faciès sismiques associés aux unités sismiques identifiées sur les données de la campagne GeoSeine02. Ces faciès sismiques sont détaillés Figure 10. Les faciès de masques acoustiques (gaz, compaction) sont également illustrés.

Les figures 12 et 13 illustrent l'organisation des sédiments respectivement au sud et au nord de la zone à masque acoustique où l'architecture sédimentaire ne peut être imagée. Ce masque acoustique se situe à l'aplomb de l'incision et représente plus de 50% de la surface explorée par la sismique (Figures 6, 8b, 9b). Quant aux figures 14, 15a et 15b, elles illustrent l'évolution de la morphologie de l'embouchure de la Seine entre 1834 et 2021, depuis la partie interne de l'estuaire jusqu'à son embouchure. Les figures 15a et 15b zooment sur les zones où des carottages ont été effectués, certaines présentant des datations. Elles permettent de détailler les âges des unités sismiques définies précédemment et de les resituer dans un contexte chronostratigraphique.

A la base, l'unité U1 constitue le substratum (marnes et calcaires Jurassiques) incisé par la paléo-vallée würnienne de la Seine (Auffret et d'Ozouville, 1986 ; Delsinne, 2005). D'une profondeur d'une trentaine de mètres dans l'axe de l'estuaire actuel, l'incision comporte latéralement des plateaux au niveau des bordures sud et nord de l'embouchure, respectivement situés à -15/-18 m et -5 m CMH de profondeur. L'unité U2 remplit et aplanit les irrégularités de l'incision dans l'axe de la paléo-vallée. Son épaisseur varie de 5 à 12m, et présente en sismique un faciès chaotique à transparent. Elle est interprétée comme une terrasse fluviale préservée, composée majoritairement de cailloutis, et décrite par Alduc et al. (1979) ; Delsinne (2005).



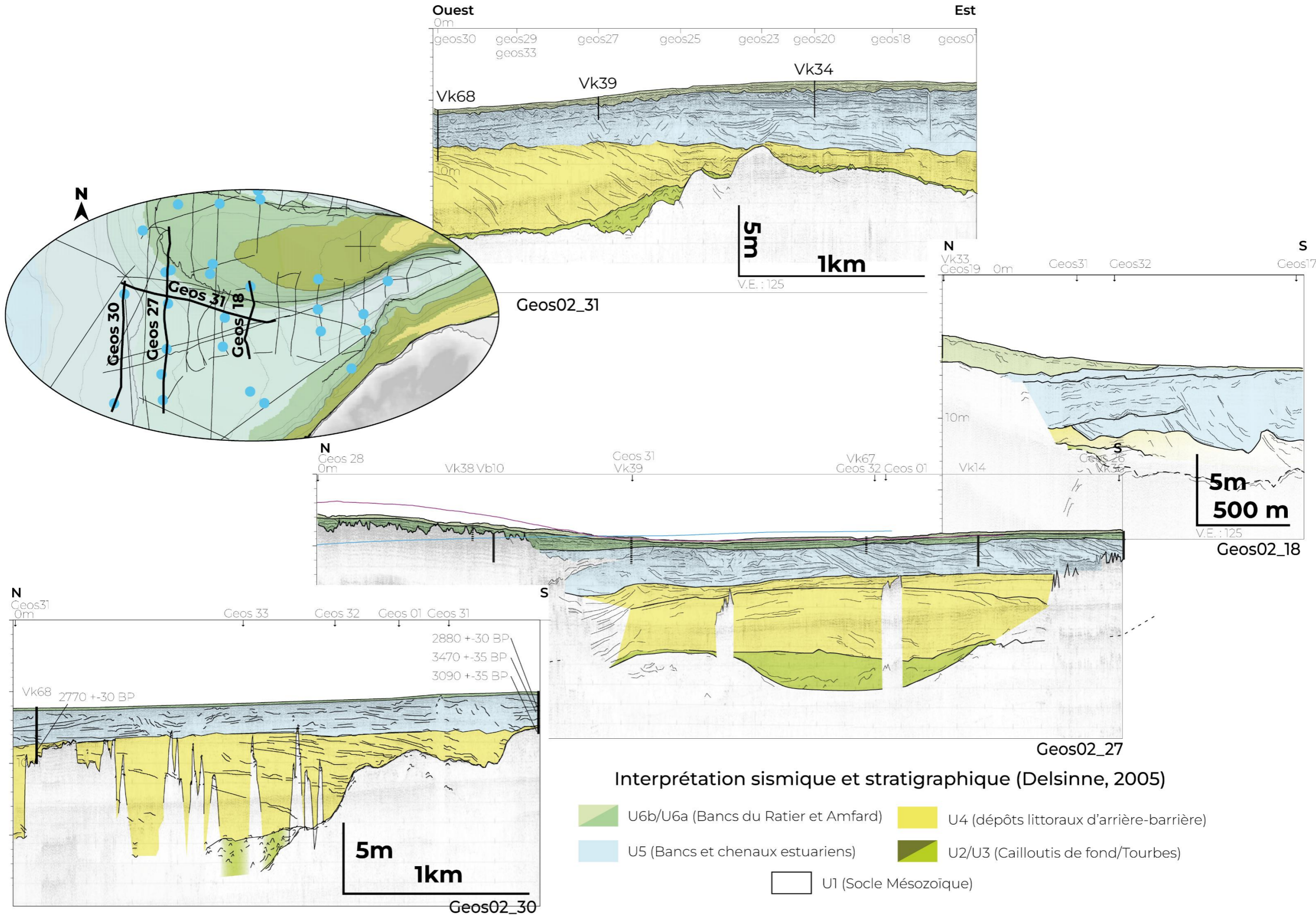
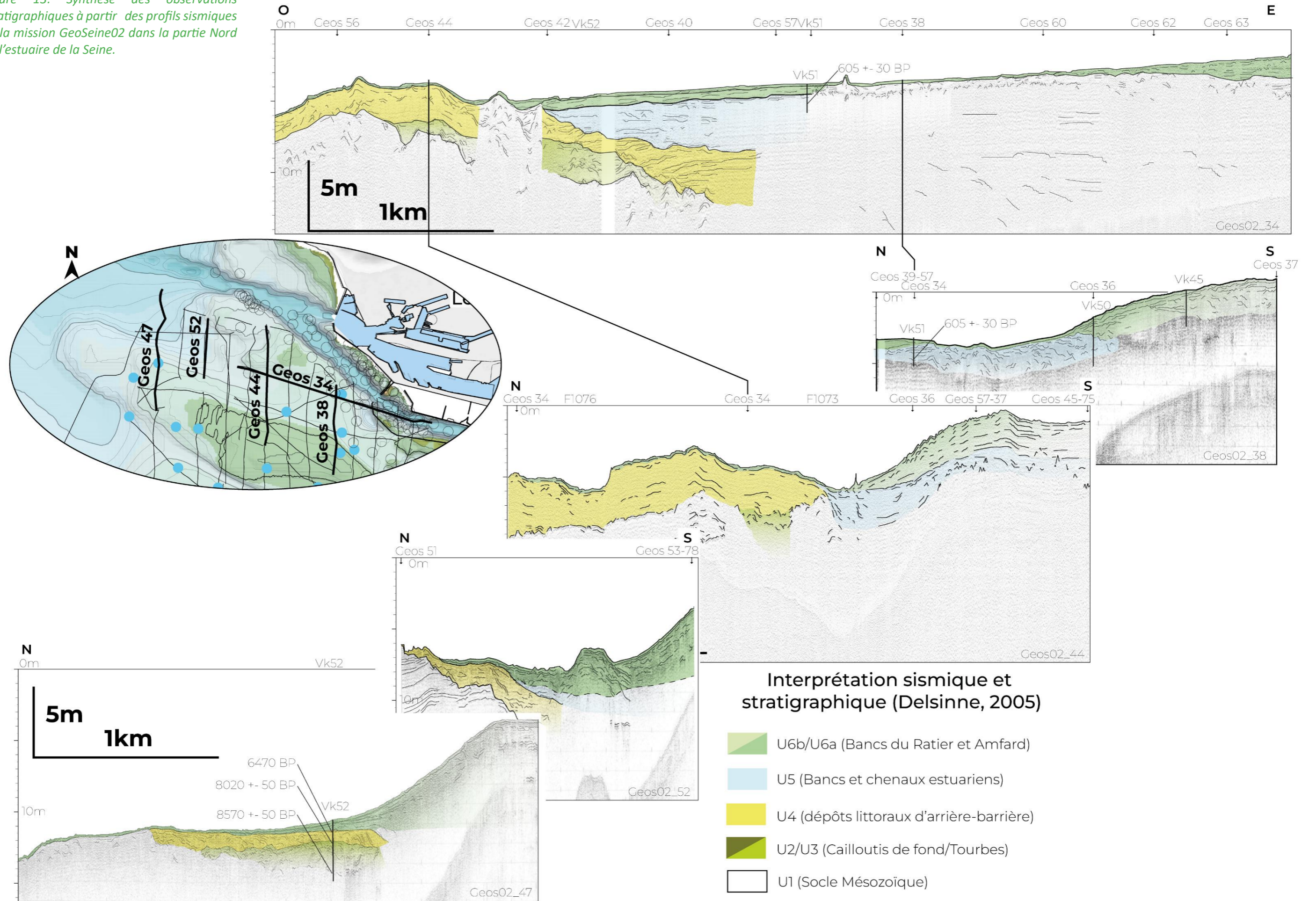




Figure 13: Synthèse des observations stratigraphiques à partir des profils sismiques de la mission GeoSeine02 dans la partie Nord de l'estuaire de la Seine.





L'unité U3 est principalement développée dans la partie inférieure de la paléo-vallée, potentiellement préservée dans la partie sud de l'embouchure et échantillonnée par la carotte Vk52 au niveau de la partie nord. Elle est identifiée comme source possible des gaz reportés sur les profils sismiques (Figure 12, Geos02\_30 et Geos02\_27). Les données de carotte (Figure 13, Geos02\_47-Vk52) démontrent que l'unité présente un faciès argilo-silteux avec des niveaux riches en matière organique (niveaux tourbeux). L'analyse des microfossiles et du palynofaciès suggère un environnement saumâtre, interprété comme les premières étapes du remplissage sédimentaire de la paléo-vallée, au début de la transgression marine. La configuration interne des réflecteurs sismiques (Figure 11) suppose une aggradation continue des dépôts sédimentaires. Une évolution latérale du faciès sédimentaire peut être supposée entre les bordures (protégés) et la partie centrale (soumise à l'action combiné du fleuve et de la marée). Le développement de U3 s'étale entre 9500 et 8700 a cal BP (Delsinne, 2005 ; Tessier et al., 2012).

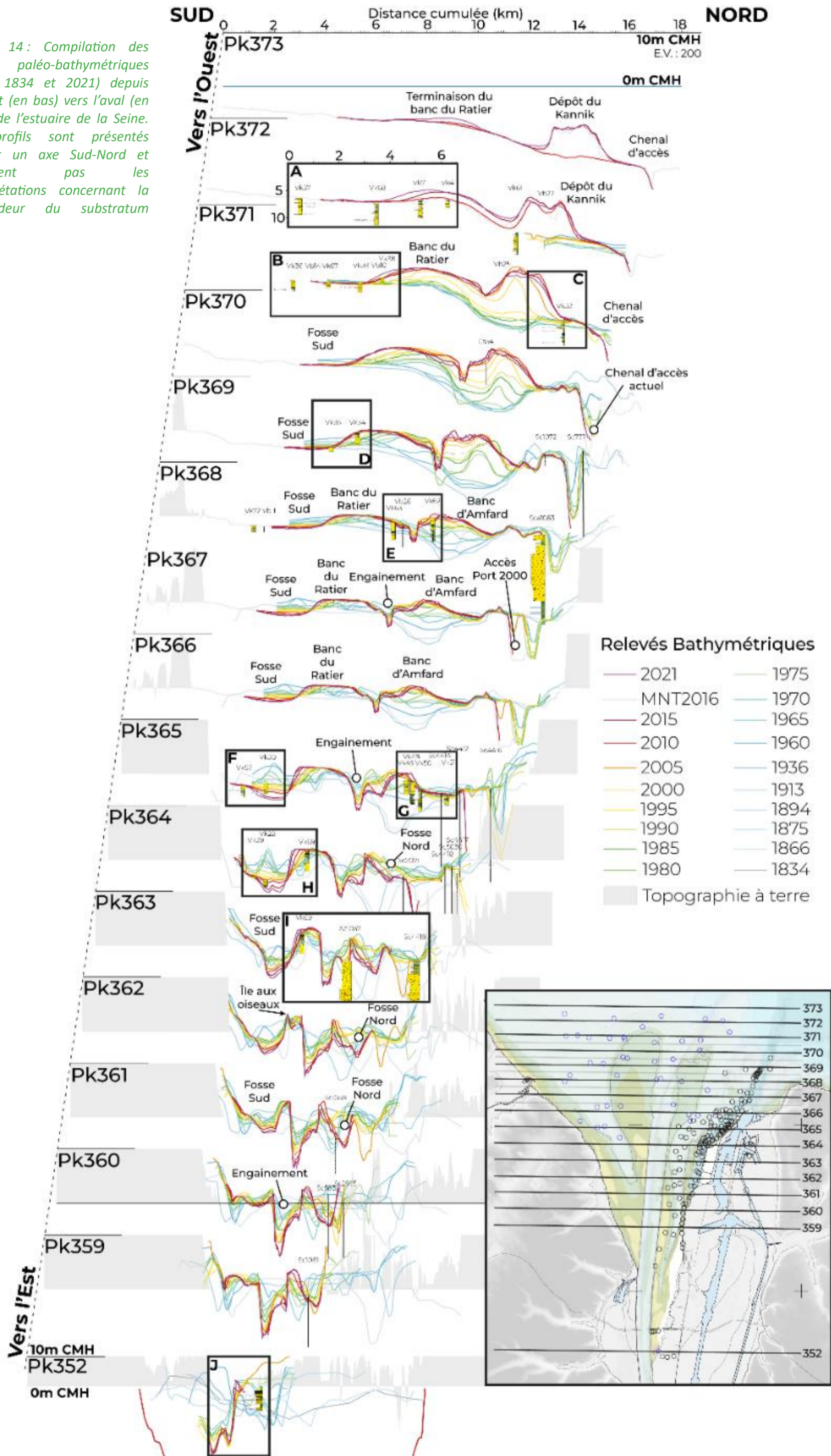
L'unité U4 est présente sur les bords de l'estuaire mais est principalement décrite dans la partie sud (Figure 12). Elle se développerait directement sur le substratum et/ou les dépôts préservés des terrasses fluviales. L'architecture interne de l'unité est caractéristique et consiste en des réflecteurs sub-parallèles à obliques présentant un pendage vers l'Est. En accord avec ces géométries, U4 est interprétée comme les restes d'un système de barrière littorale (réflecteurs obliques dirigés vers l'Est) et arrière-barrière (réflecteurs plans) qui s'installe en bordure de l'estuaire au cours de son inondation marine. Au moins trois sous-unités peuvent être distinguées (Figure 15a – Geos02\_30 & 27). Le faciès sédimentaire présente une dominance sableuse dans lequel s'intercalent des niveaux plus grossiers et argileux, localement coquilliers, avec un développement différentiel entre la partie sud (jusqu'à 3000 a cal BP) (Figures 12, 15a ; Vk 37,38) et la partie nord (jusqu'à 640 a cal BP). Une transition latérale vers le centre de l'estuaire avec des dépôts plus estuariens, représentés par l'unité U5, serait également plausible.

L'unité U5 se développe principalement dans l'axe de la vallée incisée où elle est entièrement transparente. U5 contient des systèmes chenalissants érodant les dépôts antérieurs puis un remplissage en aggradation (empilement vertical) avec des géométrie planes. Dans la partie sud, la partie supérieure de l'unité se développe, via une surface d'érosion au-dessus d'U4 (Figure 12). Toutes les carottes ayant traversé U5 présentent un faciès sédimentaire hétérolithique fait d'intervalles argileux à silteux en alternance avec des niveaux sableux, localement coquilliers (Figure 15a ; Vk37-67-68-71) Il s'agit de faciès tidaux, faisant de U5 le principal corps sédimentaire au niveau de l'estuaire en termes de surface et représentativité (plus de 60% du volume estimé par Delsinne, 2005) et dont le développement est maximal sous les barres sédimentaires actuelles. Des âges Holocènes tardifs pour U5 ont été obtenus, allant de 2800 à 400 ans cal BP sur les marges, notamment la bordure sud, à des âges autour de 7000 à 6500 ans cal BP au-dessus de la paléovallée, soit en même temps que le développement des barrières (U4) sur les bordures.

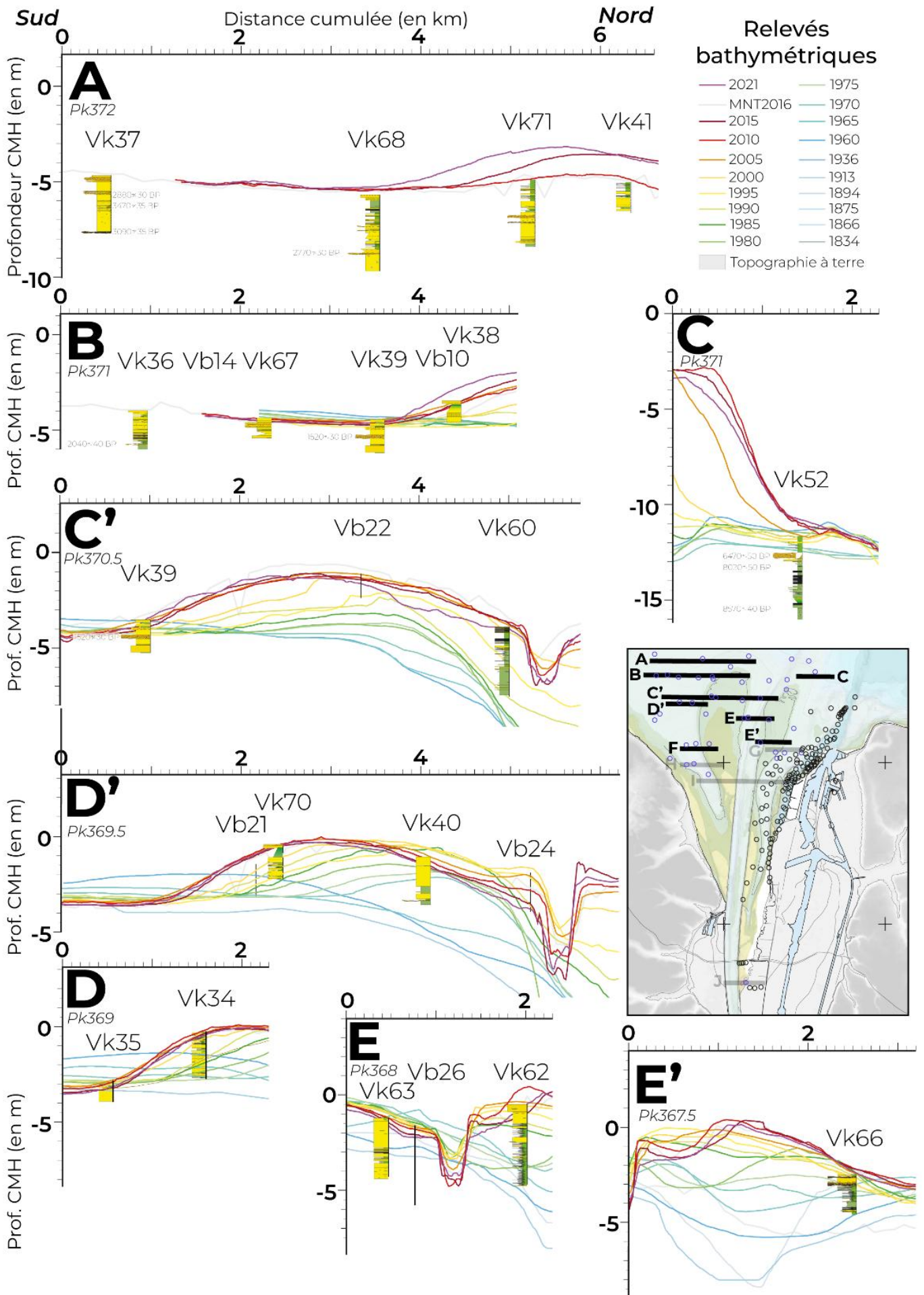
Durant ces derniers siècles, le développement de barres tidales (Unité U6) amène à la morphologie actuelle de l'estuaire. La géométrie interne de l'unité n'est pas visible en raison du masque acoustique. Selon Tessier et al. (2012), ce phénomène est probablement dû à la compaction superficielle du sable plutôt qu'à la présence de gaz, voire au caractère très homogène des sables qui composent ces barres. En effet U6 est principalement composée de sable fins, avec localement des successions tidales hétérolithiques (figures 14, 15a et 15b ; Tessier et al., 2012). La partie terminale de U6 consiste en un drapage fin, principalement le long des parties basales des barres et de la bordure externe de l'estuaire. Sa composition est essentiellement vaseuse, localement coquillière, et caractérise la dynamique actuelle de l'estuaire (Delsinne, 2005 ; Tessier et al., 2012).



Figure 14: Compilation des coupes paléo-bathymétriques (entre 1834 et 2021) depuis l'amont (en bas) vers l'aval (en haut) de l'estuaire de la Seine. Les profils sont présentés suivant un axe Sud-Nord et n'incluent pas les interprétations concernant la profondeur du substratum







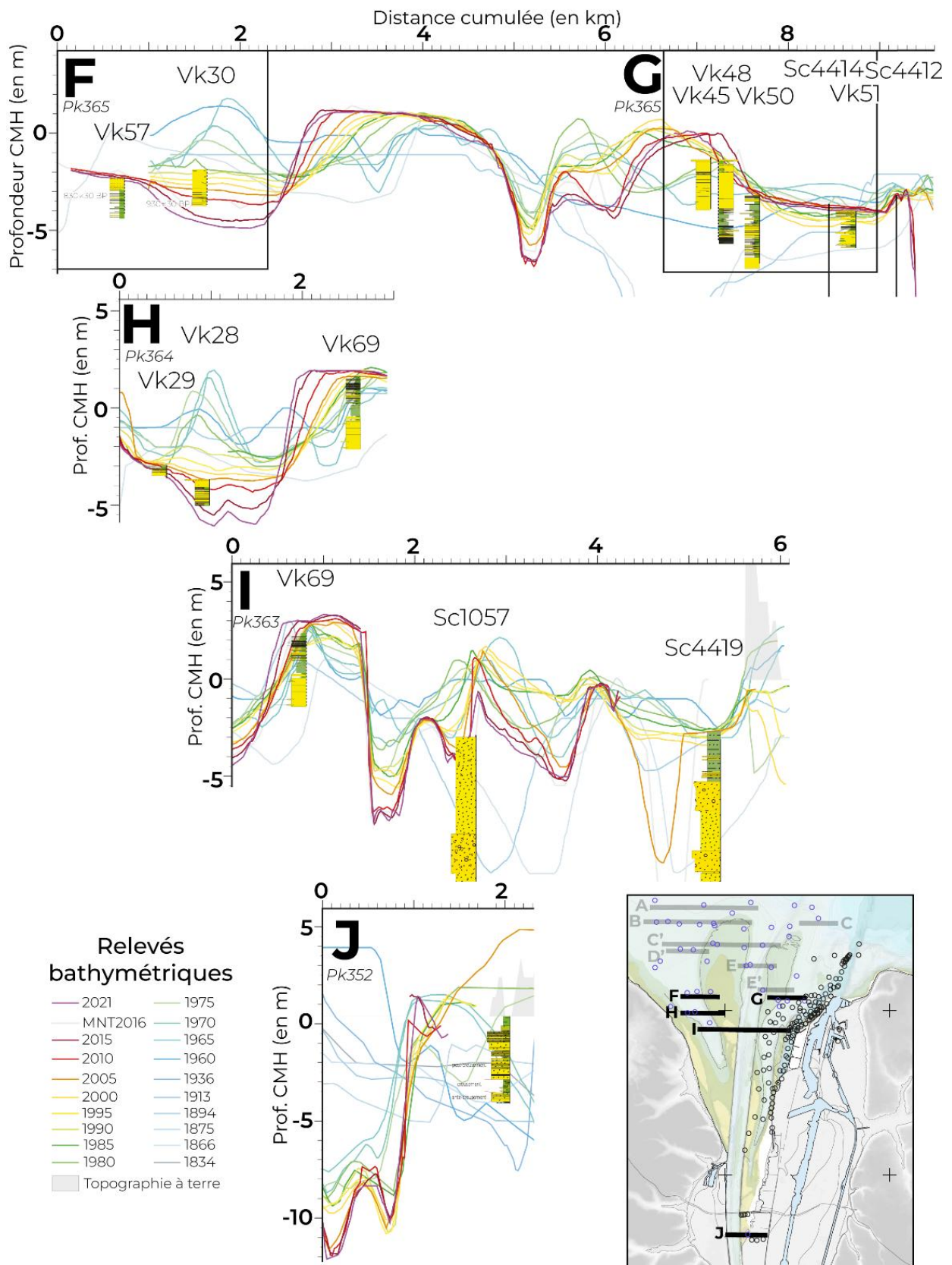


Figure 155a, b : (Pages précédentes) Zoom sur les profils paléobathymétriques incluant les logs sédimentaires synthétiques de la campagne CaroSeine (<https://doi.org/10.17600/3070150>) (Localisation Figure 14).

### III. Résumé des connaissances stratigraphiques et les facteurs de contrôle sur le remplissage sédimentaire à l'embouchure de la Seine

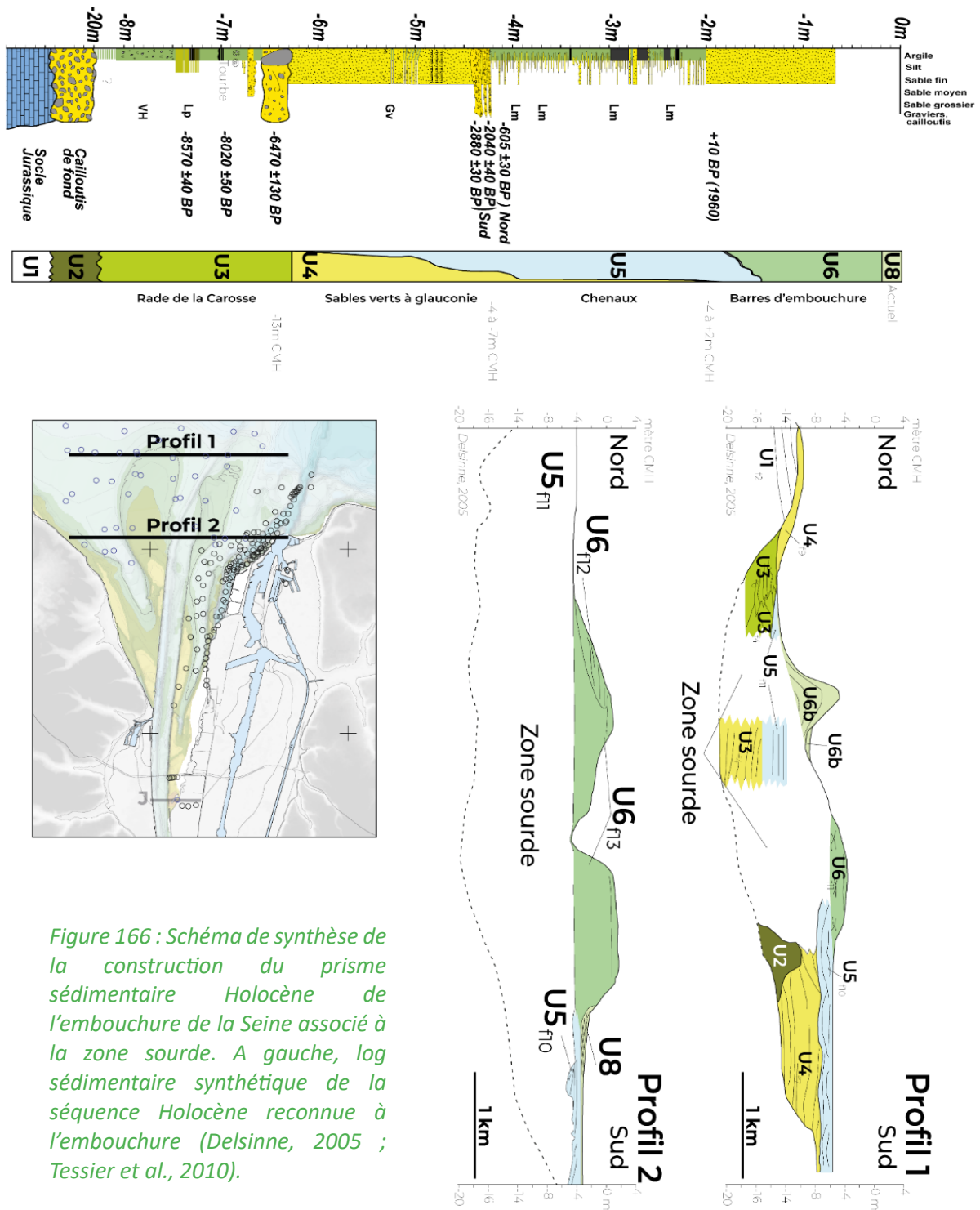


Figure 166 : Schéma de synthèse de la construction du prisme sédimentaire Holocène de l'embouchure de la Seine associé à la zone sourde. A gauche, log sédimentaire synthétique de la séquence Holocène reconnue à l'embouchure (Delsinne, 2005 ; Tessier et al., 2010).



La [figure 16](#) résume les connaissances sur la nature générale du remplissage sédimentaire ([Figure 16](#), log sédimentaire) ainsi que sur la répartition connue des unités stratigraphiques. La [figure 17](#) synthétise, sur les derniers 12 000 ans, l'évolution du niveau marin à l'échelle régionale (Hémisphère Nord) et locales (Manche, Baie de Seine) ainsi que le  $\delta O^{18}$  au regard des différentes unités stratigraphiques mise en valeur dans ce travail.

## 1. Rôle de la remontée du niveau marin depuis le dernier maximum glaciaire

### a. Le prisme de bas niveau marin et de transgression marine

U1, observable en géophysique sur les bordures de l'estuaire ou en sonde via les forages, représente le substratum Mésozoïque. La paléo-vallée Würmienne de la Seine contient à la fois des sédiments associés au bas niveau marin, à la transgression marine ainsi qu'au haut niveau marin. Au toit du substratum, U2 la recouvre en effaçant les irrégularités. Constituée de cailloutis de fonds à caractère fluviatile, U2 est interprétée comme appartenant au prisme de bas niveau marin voire déjà en partie au prisme transgressif. L'âge de la formation est estimé entre 20 000 ans (maximum glaciaire) et 9 000 ans BP ([Figure 17](#)).

### b. L'inondation marine de la vallée incisée

De 9000 ans à 8500 ans BP, la mer remonte de manière progressive, le long de la paléo-vallée de la Seine. Formant le début du remplissage de l'embouchure estuarienne, U3 se marque en bordure de l'incision par des faciès de type slikke-schorre tourbeux. Ces dépôts passent latéralement dans l'axe de la paléo-vallée à des sables marins fins à glauconie. Sur la base des datations de coquilles marines et de tourbes ([Figure 17](#)), l'augmentation du niveau marin est rapide (10 mm/an), avant de s'infléchir après 7500 ans BP (1 à 3 mm/an) ([Delsinne, 2005](#) ; [Tessier et al, 2012](#)). Plus de 70% de la surface de la Baie vont être inondés par cette rapide transgression (soit 470 km<sup>2</sup>) en inondant les anciennes paléo-vallées de la Vire, de l'Orne, la Dive, la Touques et la Seine. Masqué par la zone sourde, la base de l'unité se situerait en deçà de -15m CMH et serait estimée entre 8500 ans cal BP et 6500 ans cal BP.

### c. Le cortège de haut niveau

A la fois observé en Baie du Mont Saint Michel et dans l'estuaire de la Seine ([Tessier et al., 2012](#)), le principal changement stratigraphique s'observerait aux alentours de 6500 ans BP, en lien avec un ralentissement d'élévation du niveau marin. Depuis 7500 ans BP, la transgression ralentit (elle passe de 10 à 2,2mm/an). Deux zones s'individualisent : l'axe de l'embouchure et le plateau au sud. Vers 6500 ans BP, l'ensemble de la Baie est ennoyé et le système estuarien se déploie. C'est la période d'inondation marine maximum. La base de U4 (sur les bordures) et de U5 (dans l'axe de l'embouchure) est ainsi identifiée comme la surface d'inondation maximum du système. Le ralentissement de la vitesse de transgression permet la mise en place d'un système de barrière littorale au sud et nord de l'estuaire. La barrière passe latéralement à une dynamique estuarienne vers la partie centrale.

A partir de 3000 ans BP, la vitesse de transgression chute (1,6mm/an ; [Figure 17](#)). La dynamique tidale devient prédominante et se traduit par un étalement sur tout le système en chenaux et barre. Cet ensemble représente la part la plus importante du prisme sédimentaire, soit 60% de l'ensemble du prisme sédimentaire Holocène ([Delsinne, 2005](#) ; [Figure 16](#)). Dans l'axe de l'incision, le chenal est resté très dynamique. Sur les bords de la vallée incisée en grande partie comblée, où l'incision est moins profonde et la dynamique tidale de plus faible énergie, des corps sédimentaires dominés par les vagues tels que les barrières sableuses restent en place, notamment dans la partie nord (U4, [Tessier et al., 2012](#)).

## 2. Rôle des changements climatiques

Plusieurs travaux sur différents secteurs de l'estuaire, depuis l'embouchure jusqu'aux zones de l'estuaire amont, montrent toutes que les successions sédimentaires des derniers millénaires ont enregistré des modifications majeures du fonctionnement morpho sédimentaire estuarien. Durant la période de haut niveau marin, lorsque la remontée du niveau marin était lente et n'avait que peu d'impact sur le remplissage sédimentaire, le rôle des changements climatiques (variation des tempêtes, précipitation et débit fluvial) fut alors probablement plus important (Tessier et al., 2012, Sorrel et al., 2009). Ces résultats obtenus sur l'estuaire de la Seine s'ajoutent à tous ceux acquis sur d'autres systèmes à l'échelle de du nord-ouest de l'Europe (Billeaud et al., 2009 ; Sorrel et al., 2010 ; Sorrel et al., 2012 ; Tessier et al., 2012).

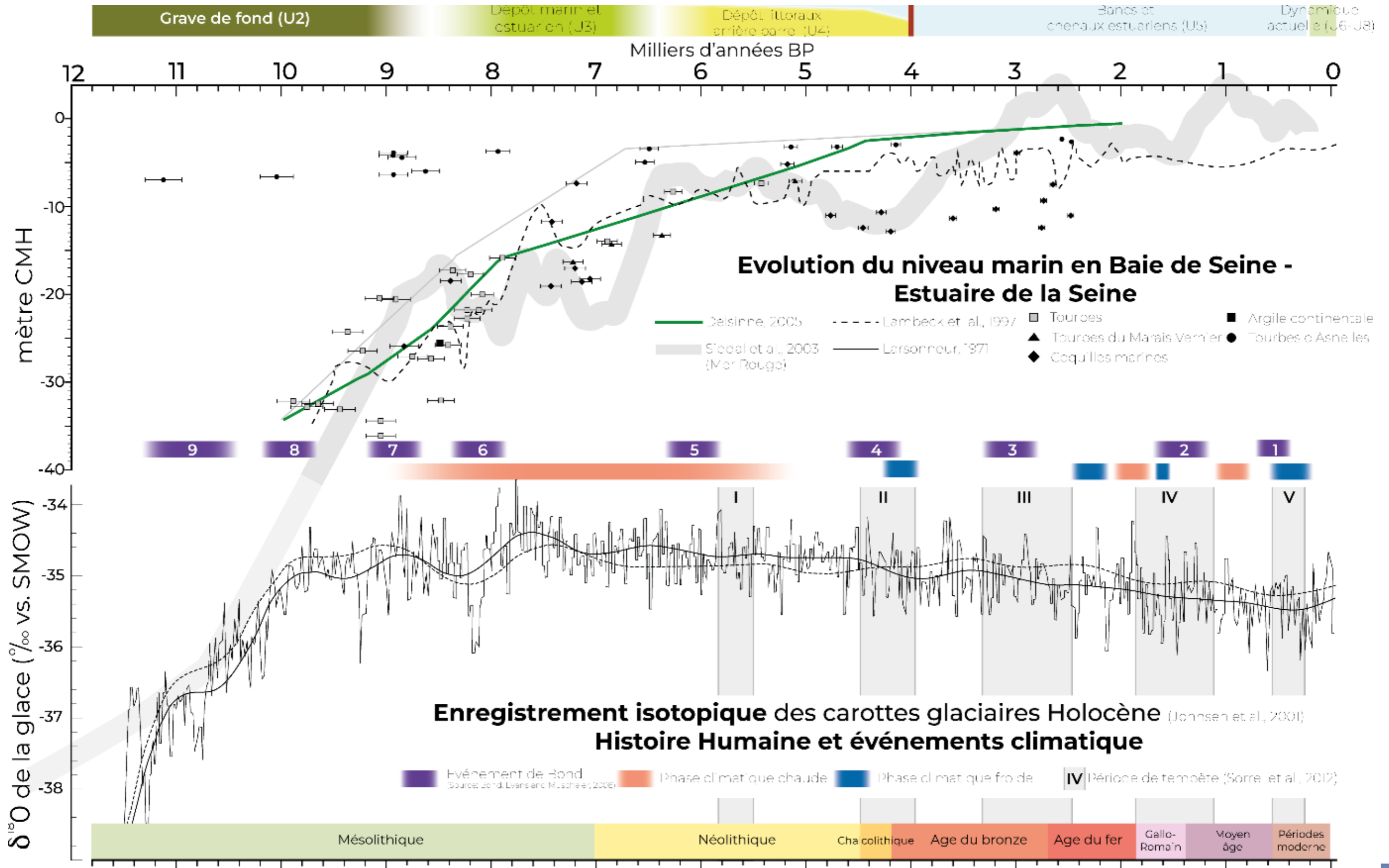
En Baie de Seine, les carottes collectées sur les bords de l'estuaire couvrent 6000 ans d'histoire de sédimentation (Garnaud, 2003 ; Figure 15a), avec une succession de faciès tidaux constitués de sable fins à moyens. Des intervalles grossiers sableux interrompent ces successions avec une période d'environ 1500 ans. Ces niveaux, corrélés à l'échelle de la Baie de Seine, indiquent qu'ils sont le résultat de changements hydrodynamiques importants à l'échelle régionale (Garnaud, 2003 ; Sorrel et al., 2009 ; Tessier et al., 2012). Des datations réalisées sur coquilles prélevés dans les niveaux coquilliers ont révélé que les âges, calés à environ 4200, 2700, 1250 et 400 ans BP, se corrélaient bien aux quatre derniers événements froids de Bond (environ 4200, 2800, 1400 et 500 ans BP) (Sorrel et al., 2009 ; Tessier et al., 2012 ; Figure 17). Ces niveaux coquilliers, interprétés comme des niveaux de tempête, identifient clairement l'impact des crises climatiques sur le fonctionnement de la dynamique sédimentaire de l'embouchure, affectée par des apports massifs de sédiments grossiers et coquilliers liés à l'action de tempêtes successives. Hors périodes de tempête, les données de Huault (1989) au nord du Havre, témoignent de l'installation de tourbière, vers 4600 ans BP et 2300 ans BP.

Plusieurs événements marquants de tempêtes ont été notés à l'échelle de l'estuaire de la Seine par Sorrel et al. (2009) et Tessier (2012) :

- Le passage Subboréal/Subatlantique (3000-2500 ans BP) correspond à une crise climatique majeure à l'échelle Nord-Ouest Européen et à l'échelle de l'embouchure, avec des dépôts de tempêtes avérés et la rupture des barrières littorales sableuse (U4) au sud de l'estuaire (Tessier et al., 2010).
- La crise climatique enregistrée autour de 4250 ans BP semble avoir impacté l'embouchure où des dépôts de tempêtes sont notifiés
- D'autres événements de crise climatiques se sont produits autour de 5800 ans BP et correspondent à des enregistrements préservés dans l'estuaire amont (Sebag, 2002). Cependant aucun marqueur de cette crise à l'embouchure de la Seine n'a été identifié parce que nous ne disposons pas de carottes suffisamment profondes. Des niveaux sédimentaires plus grossiers, riche en coquilles, pourraient être présents et témoignant d'un impact certain sur l'évolution de la dynamique de l'estuaire, car l'impact de ces tempêtes est clairement identifié dans la Baie du Mont Saint Michel (Billeaud et al., 2009).

Cependant, Tessier et al. (2012) soulignent qu'il est impossible de corréler systématiquement des changements d'environnements dans l'estuaire avec les crises climatiques globales de l'Holocène (événements de Bond et tempêtes). Après 2500 ans BP en particulier, le facteur principal qui contrôle les changements environnementaux est probablement d'origine anthropique (Frouin et al., 2010 ; Sechi et al., 2010). Comme le soulignait Tessier et al. (2012), à l'embouchure, où l'impact de 2 crises sont identifiées entre 2500 ans BP et l'actuel, l'emprise anthropique semble avoir moins de poids au regard des paramètres hydrodynamiques.

Figure 17: Synthèse 1) des environnements sédimentaires observés à l'échelle de l'estuaire de la Seine ; 2) des données d'élévation du niveau marin en Manche, Mer du Nord et en Baie de Seine (sur la base de la préservation des premières coquilles marines) ; 3) des événements climatiques à l'échelle régionale avec l'évolution des sociétés humaines.





# L'EMBOUCHURE DE LA SEINE FACE A L'ANTHROPISATION

Cette partie s'intéresse à l'évolution de l'estuaire depuis l'acquisition de données bathymétriques et sédimentologiques à l'échelle de l'estuaire, soit depuis 1834. Le travail de synthèse des cartes repose sur les travaux de Delsinne (2005), Foussard et al. (2010), et Lesourd et al. (2016).

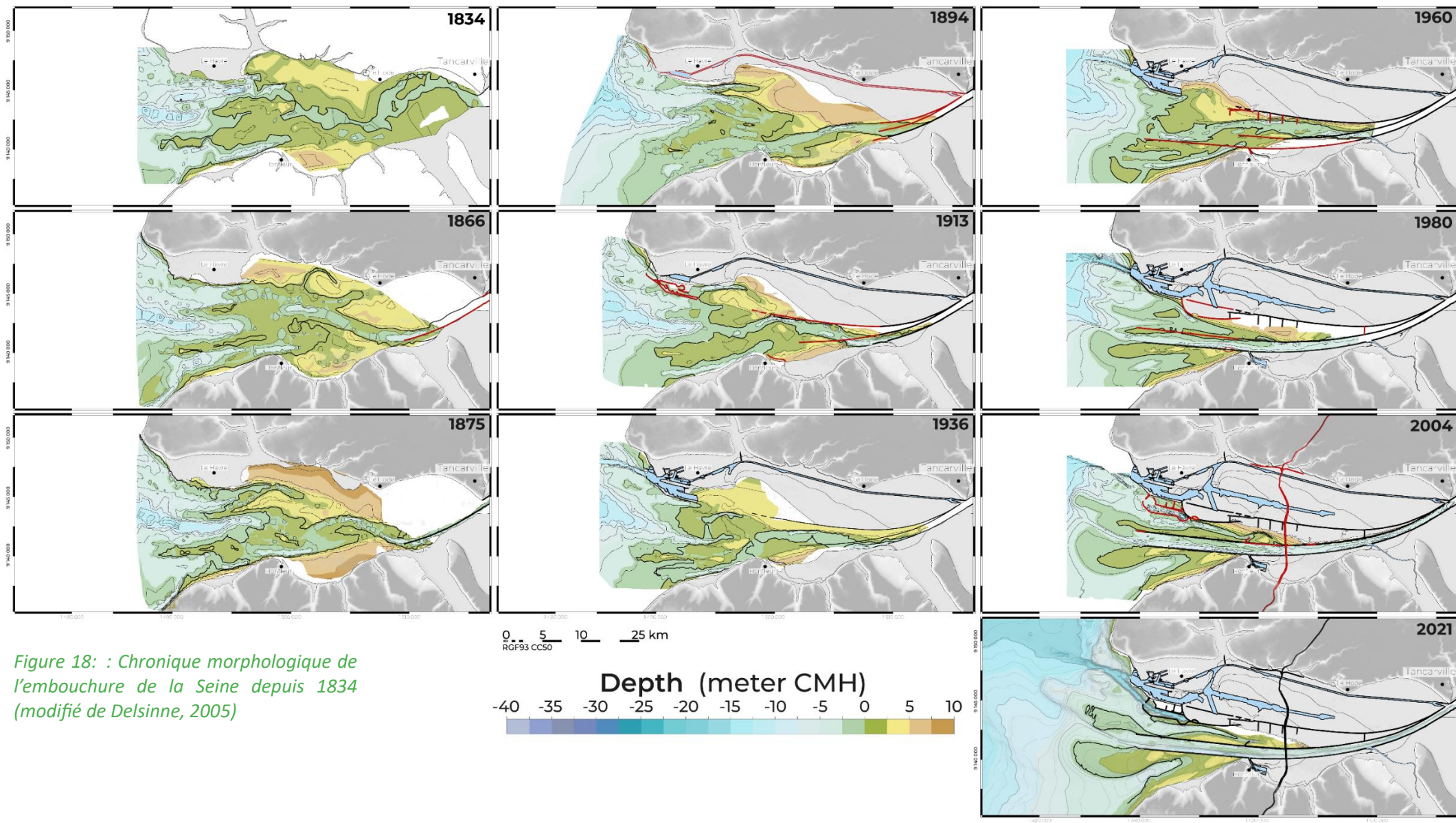
## I. Evolution morpho-sédimentaire de l'estuaire depuis 1834

### 1. De l'estuaire sauvage à l'estuaire construit

#### a. Evolution de la morphologie de l'estuaire en fonction des aménagements anthropiques

D'après les travaux de Delsinne (2005) et de Foussard et al. (2010), l'évolution morphologique de l'embouchure se marque par un comblement progressif et se décline en trois phases principales (Figure 18) :

- De 1834 à 1866 : L'embouchure est caractérisée par un large plateau intertidal en position interne (i.e. à l'ouest du Havre), recoupé par un système très divagant.
- De 1866 à 1960 : Les premiers schorres apparaissent latéralement, en lien avec le début de l'aménagement du lit de la Seine en amont de La Hode. L'exutoire de la Seine se fixe définitivement entre les bancs longitudinaux d'embouchure. L'amplitude du méandre est moins importante qu'à l'époque « sauvage » (i.e. avant 1834). La position du chenal principal est plus médiane et ramassée. En se raidissant, le chenal s'est raccourci de 4km et approfondie de 2m. Ces premières transformations notables sont contemporaines des premières phases de calibration du fleuve en amont de la Risle. Cette phase s'étale sur une centaine d'années et traduit le comblement progressif de l'embouchure vers l'ouest (i.e. vers le domaine marin).
- De 1960 à l'actuel : cette dernière période se caractérise par l'apparition des premiers aménagements *in situ* (digues, épis). Dans la zone d'étude, la configuration de l'estuaire se symétrise suivant un axe est-ouest, matérialisée par le chenal de navigation. Deux grandes barres longitudinales, en partie intertidales, s'étendent en domaine ouvert. Les barres d'embouchure se développent et progressent rapidement vers le large, soit 25 à 40m/an pour l'isobathe 0 CMH. Les chenaux latéraux se sont déportés vers l'ouest en divergeant par rapport au chenal central.



b. Evolution des environnements supratidaux, intertidaux et subtidaux depuis 1834

La figure 19 (issue du travail de Delsinne (2005) complété avec les données de 2009 à 2021) présente l'évolution des surfaces sub-, inter-, et supratidales depuis 1834 dans la zone de l'estuaire, avec une superficie initiale de 252 km<sup>2</sup>. La phase de comblement reconnue à partir des années 1860 (cf. paragraphe précédent) se traduit par une diminution assez irrégulière des surfaces intertidales, notamment pour la classe de surface « intertidal inférieur » (0-4m CMH ; de 22% à 8%) et « intertidal supérieur » (4-8.3m CMH ; de 16% à moins de 1%). Les domaines intertidaux sont à la fois influencés par la progression du domaine supratidal (entre 1834 et 1913) puis par les aménagements portuaires à partir de 1960 :

- Le domaine intertidal inférieur baisse entre 1834-1875 à la faveur du domaine intertidal supérieur, puis entre 1960-1970 à la faveur du domaine subtidal.
- La réduction du domaine intertidal supérieur est majoritaire depuis 1875 avec deux phases de réduction : la première en 1894-1913, la seconde entre 1975-1980. Les périodes 1894-1913 et 1975-1980 sont des phases charnières pour l'intertidal supérieur, avec un remaniement de plus de 70%.

Les dépôts massifs en domaine intertidal se traduisent donc par un exhaussement et la continentalisation (jusqu'à 30% des surfaces), permettant à partir de 1913 l'apparition des schorres (Delsinne, 2005 ; Figure 19).

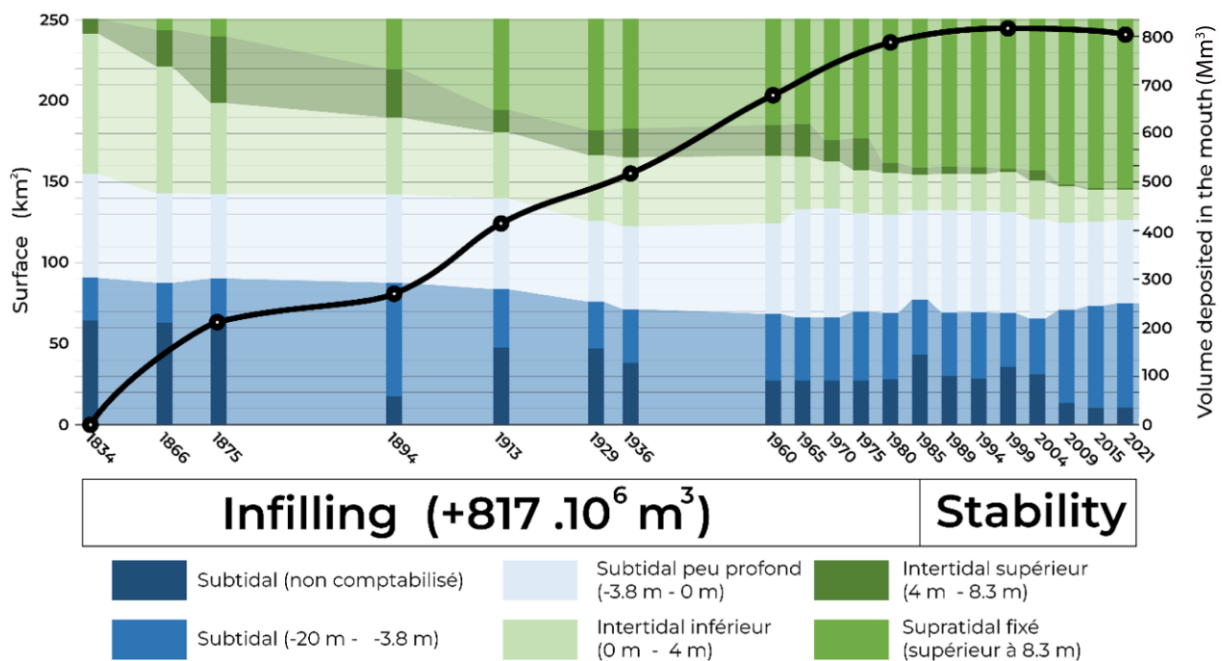


Figure 19: Evolution en km<sup>2</sup> des domaines sub-, supra- et intertidaux depuis 1834 (modifié de Delsinne, (2005)) pour la zone de l'estuaire.



### c. La vasière Nord

La rapidité de l'évolution de la vasière nord, telle qu'illustrée figure 20, reflète l'impact des aménagements sur les dynamiques morpho-sédimentaires depuis 1960 et la diminution des surfaces intertidales. Plusieurs études ont porté sur son évolution morphologique (Avoine et al., 1996 ; Hoyez et Cuvilliez, 2001 ; Lesourd et al., 2001 ; Delsinne, 2005 ; Muntoni et Lemoine, 2022). La surface intertidale de la vasière nord représente 15km<sup>2</sup> en 1970 (Figure 20). Entre 1970 et 2010, cette zone n'a cessé de décroître, plus particulièrement en 1990 avec l'établissement du pont de Normandie. A l'est du pont, la zone intertidale s'est progressivement transformée en schorre. A l'ouest, la zone, plus ouverte, est restée plus stable (Delsinne, 2005). De 1970 à 2000, le domaine intertidal passe de 15km<sup>2</sup>

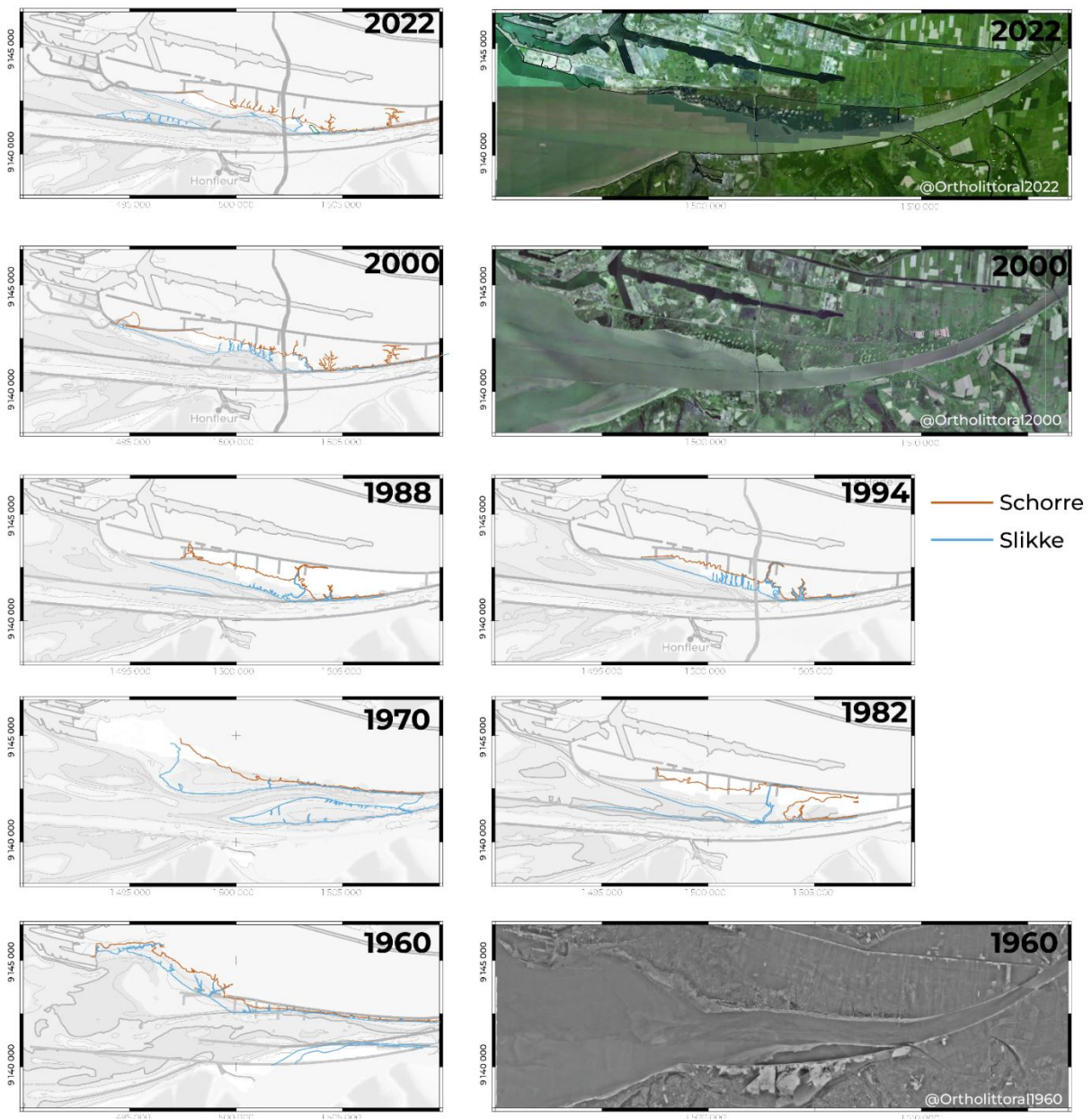


Figure 20: Evolution morphologique de la vasière nord et des schorres adjacents de 1960 à 2022 (modifié de Delsinne, 2005 et complété par les données de 2022). Les données sont la synthèse de levés GPS du port du Havre (cartes au 1/20000, limites schorres +83m CMH), de levés bathymétriques du port de Rouen et de 3 missions d'orthophoto. Les données ne sont pas non exhaustives, mais suffisent pour décrire l'évolution de la vasière.

à ~3km<sup>2</sup> (soit une diminution de 80%) puis devient stable. Les estimations de dépôt sédimentaires calculées par Delsinne (2005) témoignent d'un flux de 3.1Mm<sup>3</sup> /an sur la période 1963-1986, puis de 0.5Mm<sup>3</sup> /an entre 1986 et 1994. (Avoine et al., 1996, dans Delsinne, 2005). Avec le développement de port 2000 entre 1999 et 2005, plusieurs constructions/aménagements de digues et dragage ont été (ou sont encore effectués) afin de contrôler l'hydrodynamisme et la dynamique sédimentaire au sein de la fosse Nord. Durant cette période, le domaine intertidal subit une baisse de 30 km<sup>2</sup> à 20 km<sup>2</sup>. A l'amont du pont, on notera tout particulièrement la création d'une brèche amont pour la formation d'un méandre artificiel (longueur de 400m à +2.5m CMH) (Figure 20 ; Muntoni et Lemoine, 2022 pour plus de détail). Le remplissage sédimentaire post-creusement (Figure 15b, section J) semble similaire au remplissage pré-creusement avec des sable fins à moyen, suivi d'une sédimentation plus vaseuse.

## 2. Evolution de la couverture sédimentaire

Le recueil des données sédimentologiques par Lesourd et al. (2001, 2016) et Delsinne (2005) permet de construire cinq cartes de la répartition des sédiments superficiels depuis 1834 (Figure 21). Les cartes de 1834 à 1913 sont le résultat des interprétations des minutes de sondes. La carte de 1996 est une compilation des données (bennes) prélevées de 1993 à 1996 (programme Seine Aval phase 1 - Lesourd et al., 2000, 2016). La carte de 2010 est le résultat du projet Seine Aval COLMATAGE, compilant 561 échantillons suivant une grille régulière d'échantillonnage. La carte de 1977 a été réalisée par Avoine (1980).

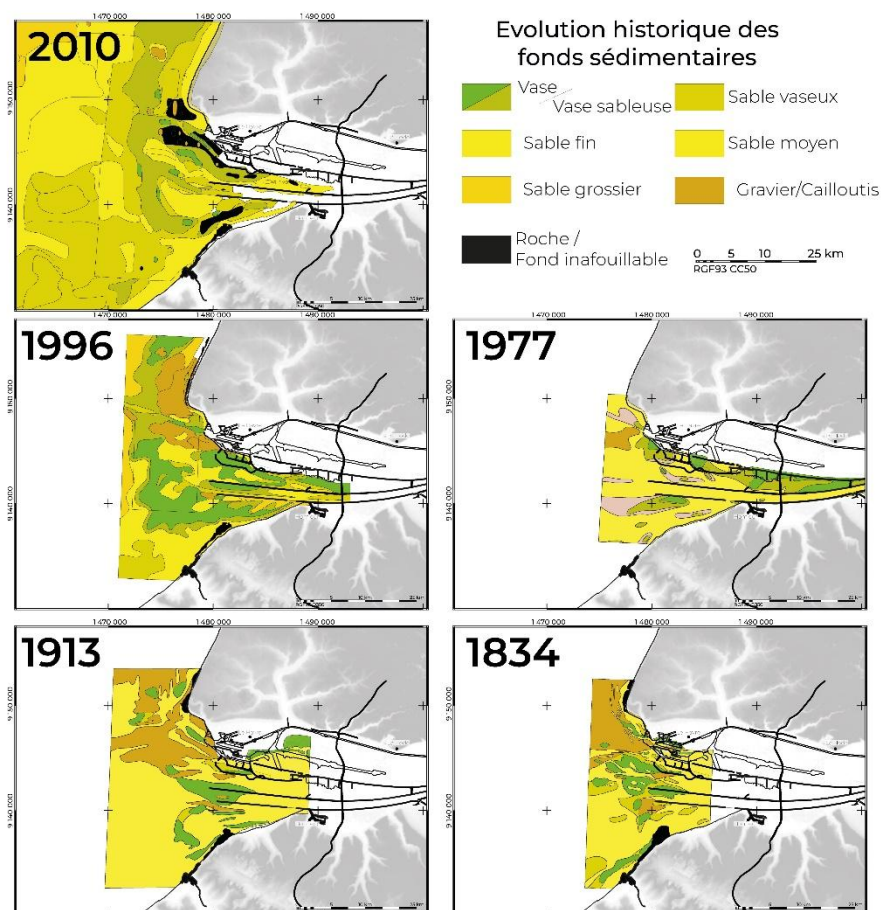


Figure 21: Evolution de la couverture sédimentaire (cartographie réalisée à partir de différentes campagnes de prélèvement, modifié de Lesourd et al., 2016).

Les résultats témoignent d'un impact important de l'aménagement portuaire sur la dynamique sédimentaire à partir de 1977, avec le développement vers l'aval des digues. Au 19<sup>ème</sup> siècle, environ 65% des sédiments superficiels étaient sableux, avec une transition vers les graviers et cailloutis plus particulièrement vers le nord. Les faciès vaseux sont plutôt associés aux dépressions et chenaux (Figure 21 ; Lesourd et al., 2016). En 1977, la configuration confirme le recouvrement des dépôts grossiers par du sable et sable vaseux. La proportion de sable reste dominante, bien que l'aire totale en sédiments fins augmente. Sur la période 1993-1996 (carte 1966), les environnements sableux sont cantonnés aux barres. Les faciès vaso-sableux et vaseux sont dominants et se développent sur le sable et principalement aux pieds des bancs sableux, ainsi que dans les chenaux. L'augmentation de la répartition des sédiments fins est associée à la modification de la circulation estuarienne, en lien avec les aménagements portuaires. La carte de 2010 montre une remobilisation des sédiments fins, cette diminution des surfaces vaseuses pouvant sans doute être mise en corrélation avec une diminution des débits fluviaux (et donc moins de crue estuarienne) durant cette période. Cette diminution est contrebalancée par l'augmentation d'un matériel mixte vaso-sableux et sablo vaseux, associé à une migration vers l'ouest des sables vaseux.

L'évolution de la couverture sédimentaire sur la zone centrale de l'estuaire (Figure 22) témoigne de la proportion constante des sédiments grossiers (graviers, cailloutis, roche) jusqu'à 1977. L'évolution la plus importante apparaît entre 1977 et les années 1990, avec une augmentation de la proportion de vase et de vase sableuse (de 16% à environ 50%). Lesourd et al. (2016) témoigne d'un envasement toujours important en 2009, mais avec une évolution du faciès et de son épaisseur (avec 10 cm à localement 1m d'argile pour la période 1993-1996 couvrant les dépôts sableux, à un mix d'argile vase et de sable pour la carte de 2009). Une baisse d'environ 40% de la surface vaseuse entre 1996 et 2009 est montrée, avec une augmentation des vases sableuses et sables vaseux. Une augmentation de la surface des fonds non remobilisables (i.e. Galets, vases compactes anciennes) se produit également (Figure 22). A noter que la répartition des sédiments vaso-sableux, pour la période 2010, s'effectue en dehors de la zone de calcul des proportions.

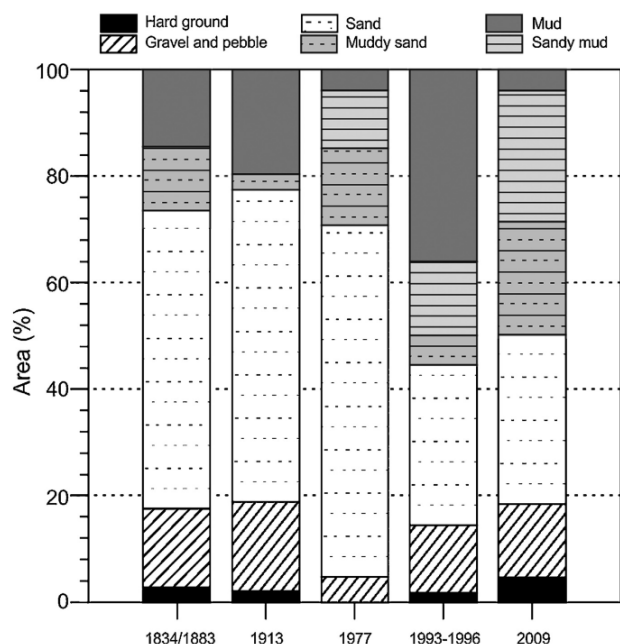


Figure 22: Pourcentage de l'aire correspondant aux différents faciès (argile, argile sableuse, sable argileux et sable) suivant la délimitation de l'aire la plus petite (1834) et calculée pour chaque date (1834, 1913, 1977, 1993-1996, 2009). Le faciès de vase- sableuse n'est pas discriminé pour les périodes 1834 et 1913 et a été associé au faciès vaseux (d'après Lesourd et al., 2016).

La Figure 23 cartographie en détail la localisation des fonds non remobilisables (cailloutis, roches) pour quatre périodes. A noter que les roches le long de la côte et de la fosse sud sont surtout les roches du calvados. Sinon, les cailloutis prédominent et appartenant aux nappes flandrienne et anté-flandrienne, comme le poulier du Ratier ou dans la partie nord, aux environs du port. La surface de ces fonds



« durs » restés en place a été calculée sur la différence (sédimentation versus érosion) entre les fonds bathymétriques des cartes correspondantes (Différences entre 1913-1834, 1975-1913 ; 1995-1977, 2010-1995 ; 2021-2010). Sur l'ensemble des fonds durs cartographiés, la majorité se situe au niveau de la partie nord-ouest de l'embouchure de l'estuaire, dans l'axe de la sortie du port du Havre. Au niveau de l'embouchure. La partie sommitale du banc du Ratier forme également un fond dur, avec la préservation des différents niveaux sableux grossier et cailloutis (ce qui explique sans doute en partie la zone sourde à l'aplomb du banc).

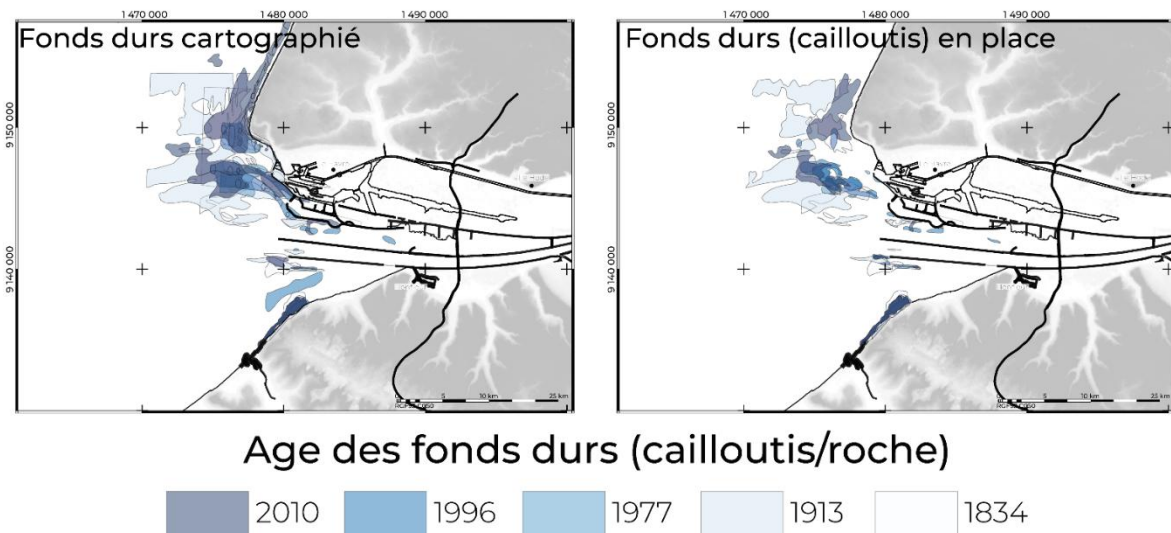
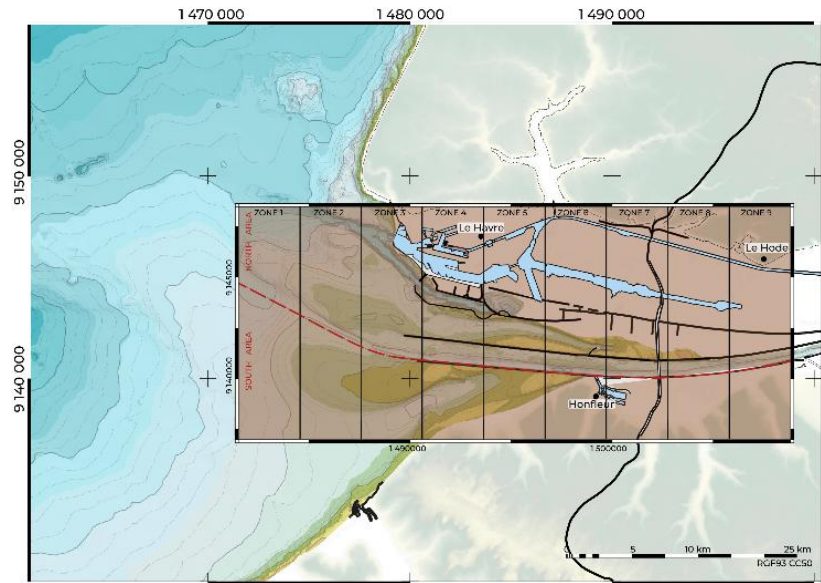


Figure 23: A gauche, illustration des fonds durs (roches et cailloutis) cartographiés, synthétisés à partir des données de Lesourd et al. (2016). A droite, cartographie des fonds durs restés inchangés en place selon les différentiels morphologiques de l'estuaire réalisés entre 1834 et 2021. Les zones en érosion ayant pu affecter ces dépôts.

L'une des conclusions du travail de Lesourd et al. (2016) met en évidence la transition d'un estuaire naturel dominé par la marée à un estuaire dominé par le fleuve Seine. Entre les différentes périodes d'échantillonnage, les conditions hydrologiques ont évolué (faible débit pour les périodes 1977 et 2009 et débit modéré et haut pour la période 1993-1996). L'évolution des aménagements a également joué un rôle important sur les différents paramètres conditionnant la morphologie de l'estuaire (débit fluvial, la marée et les vagues). Les faciès cartographiés en 2009 par Lesourd et al. (2016) indiqueraient une érosion globale des vases de l'estuaire et d'une mise à nu du chenal Nord, avec la présence sur le fond de fragments coquilliers (remaniement important des sédiments), de sable thixotropique (dépôt instable) et de dépôts vaseux compacts (même si la plupart semblent associés aux travaux de dragage (Lesourd et al., 2016 ; Cuvilliez et al., 2009).

## II. Quantification du comblement estuarien entre 1834 et 2021

Figure 24: Zone de calcul pour l'estimation des volumes sédimentaires déposés entre 1834 et 2021, ainsi que des zones en érosion et dépôt. L'espace est segmenté en 9 zones



La figure 24 illustre l'aire de calcul définie pour estimer les volumes sédimentaires déposés ou érodés depuis 1834. De l'aire total du rectangle (~313 km<sup>2</sup>), nous avons exclu les collines entourant l'estuaire, ce qui implique une aire d'estimation finale de 252 km<sup>2</sup>. Nous présentons les budgets sédimentaires de manière globale (Figure 25). La seconde partie (Figure 26) présente la répartition des volumes déposés et érodés, suivant une segmentation de la zone Ouest en Est (9 zones sont délimitées), elles-mêmes segmentées suivant un axe Nord-Sud, dessiné le long de l'engainement. L'évolution des zones sera mise en lien avec les figures 15 (détail des carottages) pour préciser la nature des sédiments en érosion ou en dépôt.

### 1. Evolution du volume sédimentaire général depuis 1834

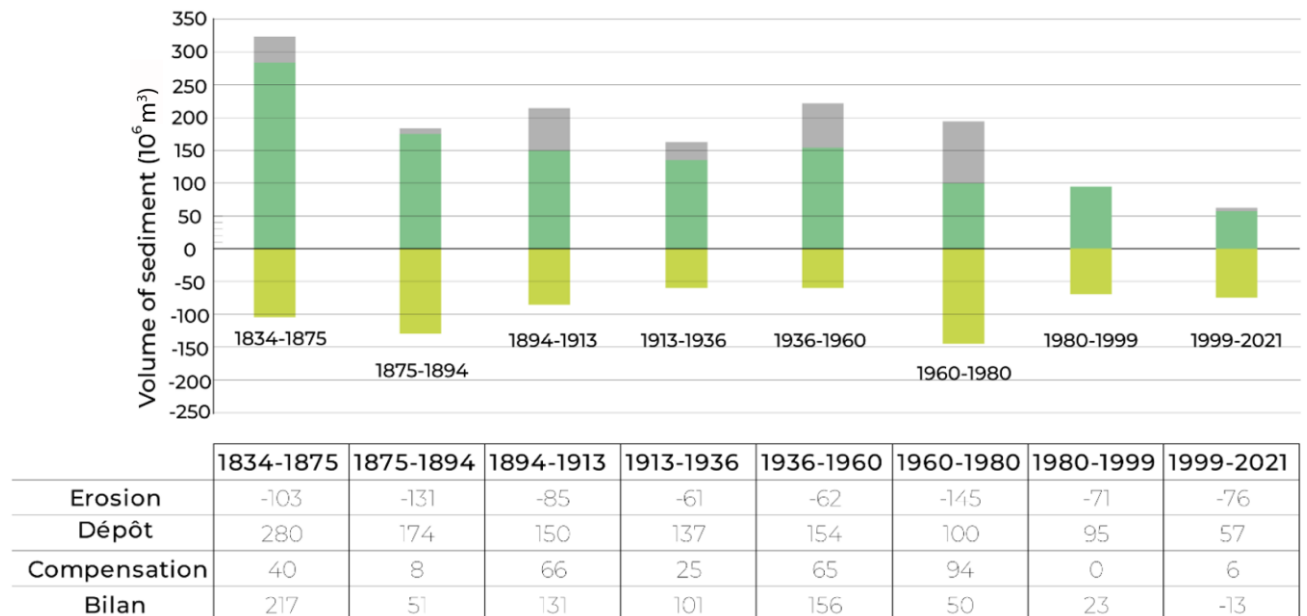
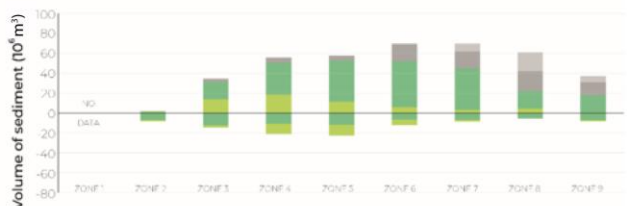
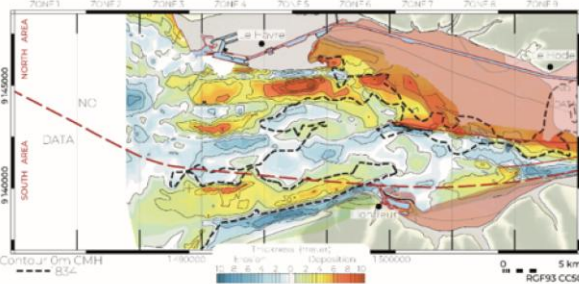


Figure 25: Budget sédimentaire pour la zone de l'estuaire entre 1834 et 2021 pour un pas de temps d'environ 20 ans.

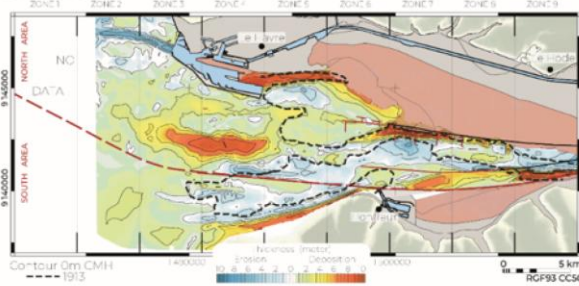
D'après Delsinne (2005) et selon la figure 26, le budget sédimentaire est positif et stable pour chaque période étudiée de 1834 à 1960, traduisant un comblement continu. Cependant, les volumes en jeu et la répartition des zones en érosion et en dépôt sont très différentes pour chaque période. Les volumes déposés et érodés décroissent graduellement de 1834 à 1960, ce qui traduit une diminution des échanges sédimentaires. Depuis 1875, une part importante (50%) des volumes déposés sont piégés définitivement (schorres, extension portuaire), ce qui traduit le caractère irréversible du comblement.

## 2. Répartition des volumes sédimentaires érodés et en dépôt

**1834 - 1913**



**1913 - 1960**



**1960 - 2021**

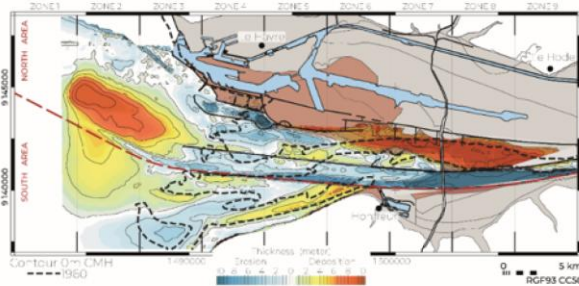


Figure 26: Répartition des volumes sédimentaires érodés (en bleu) et déposés (en rouge) le long de l'embouchure estuarienne de la Seine suivant trois périodes de temps : 1834-1913, 1913-1960 et 1960-2021. A droite, la quantification des volumes sédimentaires érodés et déposés est représentée. On distingue les volumes issus des zones sud, nord, et de la continentalisation.



#### a. De 1834 à 1913

De 1834 à 1913, le bilan sédimentaire est positif et associé à une poldérisation rapide de la partie interne de l'estuaire, à la fois au nord et au sud du chenal central (Figure 26 – zones 6 à 8). Cette période observe les premières phases d'aménagement avec le développement du canal de Tancarville et du port du Havre au nord ainsi que celui de Honfleur au sud (avec notamment la construction de la digue jusqu'à la Risle). Hormis la partie la plus amont du chenal, endigué à partir de 1894, le chenal central évolue rapidement et de manière naturelle avec un décalage vers le sud, érodant légèrement (de 2 à 4m) l'axe de transition entre deux bancs (Figure 26 – zones 5-6). Le long de l'estuaire, les zones de dépôt sédimentaire se localisent à la fois :

- Sur les bordures nord et sud de l'estuaire, correspondant à la poldérisation progressive de l'estuaire (zones 6 à 9).
- Les bancs existant en 1834 sont en partie conservés. Les dépocentres les plus importants se concentrent au niveau des anciennes dépressions et chenaux, au nord et au sud de l'estuaire, avec les plus gros volumes déposés situés dans la partie nord (Figure 26).
- Le long de la côte sud, une érosion particulièrement marquée (~6m maximum) se connecte aux bassins de Honfleur.

#### b. De 1913 à 1960

Entre 1913 et 1960, la continentalisation des zones nord et sud de l'estuaire se poursuit, conséquence probable de l'extension des digues submersibles nord (jusqu'à l'amont de Honfleur) et sud jusqu'à Honfleur (entre les années 1950-1960). En aval de Honfleur, la digue submersible du Ratier est construite entre 1950 et 1960. L'impact du creusement du futur de chenal de navigation, au cours des années 1958-1960, n'est visible que sur la cartographie 1960-2021.

Le long du chenal (Figure 26 - zones 6-9) et entre les digues aménagées, l'axe du chenal de 1913 est en partie comblé avec des dépocentres d'axe Ouest-Est présentant une puissance d'environ 10-12m maximum. Ces dépocentres sont déconnectés via le développement des chenaux latéraux entre 1913 et 1960 ; la partie sud du chenal observant une sédimentation importante entre Honfleur et la Risle.

Au sud du Havre, les zones 1 à 3 concentrent l'essentiel des dépôts. Un important dépocentre allongé suivant un axe ouest-est est cartographié à l'embouchure du chenal de 1913. Cette zone correspond à un ancien fond topographique notifié sur la carte topographique de 1834. Au sud de la nouvelle digue du Ratier, le dépocentre développé entre 1834 et 1913 est en grande partie érodé. Sur la partie sud de l'ancien dépocentre, un décalage de l'axe principal d'érosion est observé.

#### c. De 1960 à 2021

Plusieurs phases d'aménagement affectent la morphologie de l'estuaire et sa dynamique sédimentaire. Les travaux de creusement du chenal de navigation actuel, entre 1958 et 1960, fige le chenal de navigation à l'amont de Honfleur. En plusieurs phases, les digues submersibles basses sont prolongées vers l'aval, suivi de la création de brèches sur les digues basses nord et sud. D'importants travaux d'aménagement sont effectués au niveau du port du Havre entre 1973 et 1975, puis dans les années 2000 (Port 2000). Le pont de Normandie est lui construit entre 1988 (début des remblais du pont) et 1994. L'évolution rapide de la vasière nord et sa fixation (Figure 20) est symptomatique de l'évolution et la répartition des volumes sédimentaires durant cette période.

Le long de l'actuel chenal de navigation, le creusement du chenal (~10m) est compensé par la poldérisation de la partie nord de l'estuaire, qui conduit à la progression rapide du schorre sur cette zone (Figure 26 – zones 6 à 8). A l'est du pont de Normandie, l'axe du chenal en 1960 est en partie

comblé avec le développement des bancs de la Passe et Aval, limité au nord et sud par l'érosion de la fosse nord (dragage et évolution naturelle) et l'engainement (via dragage).

L'embouchure de l'estuaire devient le dépocentre principal sur cette période, avec la migration vers l'ouest des dépo-centres de 1913-1960. Cette évolution est illustrée par la modification du banc d'Amfard, auparavant appelé la gambe d'Amfard. L'augmentation exponentielle du volume sédimentaire en zone 2 (Figure 26) est relatif au dépôt de clapage du Kannik, abandonné depuis 2016. Au sud de l'engainement, le dépo-centre se prolonge en aval du banc du Ratier, ainsi qu'au sud de la fosse sud, correspondant à un chenal secondaire en 1960. L'axe d'érosion le long de la fosse sud migre légèrement vers le nord entre 1960 et 2021 (jusqu'à 4m), accroissant l'effet d'expulsion vers l'ouest du banc du Ratier.

### III. Etat des lieux des connaissances de la couverture sédimentaire actuelle.

La figure 27 illustre l'état des lieux de la nature des sédiments des 5 premiers mètres de sédimentation, observables via les carottes sédimentaires prélevées en 2003, sous la bathymétrie de 2021. Deux tendances se dessinent au nord et au sud de l'engainement. Au nord de l'engainement et

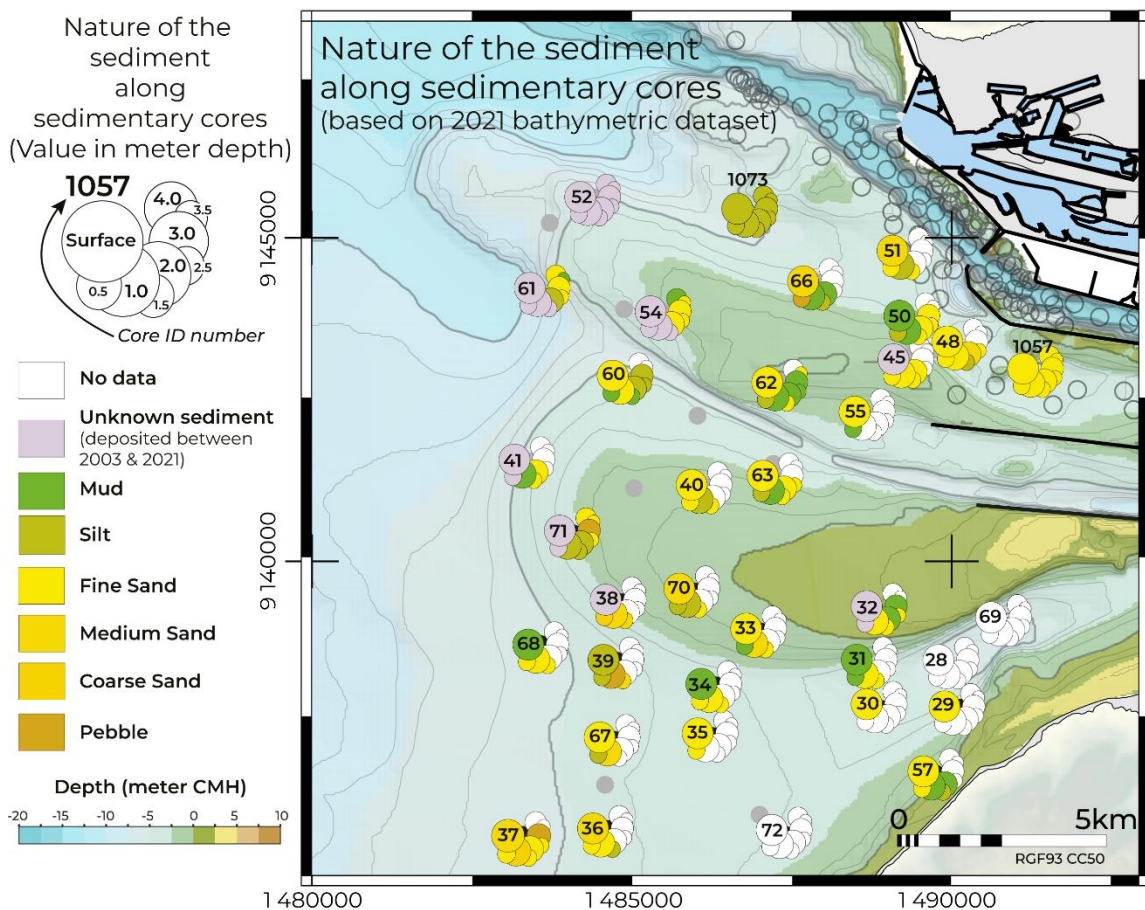


Figure 27 : Figure de synthèse représentant les faciès sédimentaires préservés en 2021 pour les carottes Caroseine02. Pour une carotte, le pas d'échantillonnage est de 50cm entre deux cercles et va jusqu'à 5m sous le fond bathymétrique du MNT de 2021. La couleur représente le faciès sédimentaire principal. Concernant les cercles blancs, soit la carotte n'a pas atteint la profondeur souhaitée, soit l'information sédimentaire a été érodé.

à l'ouest du banc d'Amfard, la nature sédimentaire des dépôts est inconnue, lié notamment au dépôt du Kannik recouvrant les informations sédimentaires. Sur les bancs d'Amfard et du Ratier, où la sédimentation est nulle voir négative au cours des vingt/soixante dernières années (Figure 26), les prélèvements sédimentaires de 2003 sont en partie érodés et seuls les deux premiers mètres de sédiment sont connus aujourd'hui. A l'ouest du banc du Ratier, les carottes sédimentaires ont été enfouies sous moins d'un mètre de sédimentation. A l'inverse, dans l'axe de la fosse sud, plus de 2m d'érosion est observé entre 1960 et 2021 (Figure 26), effaçant les informations prélevées par les carottes sédimentaires. Dans cette zone, les sédiments actuels mis à nu ont plus de 1000ans et sont potentiellement sableux car appartenant à l'unité sismique U4 (Figure 16b, encadré F).



# CONCLUSION

## 1. Conclusion : résumé des principaux résultats

En l'état actuel des données disponibles et des travaux ayant été réalisés au niveau de l'embouchure de l'estuaire de la Seine, la synthèse que nous avons pu réaliser dans le cadre du projet PSES révèle des zones d'ombres à l'échelle de la géométrie du remplissage sédimentaire Holocène et sur la nature des dépôts superficiels.

Nous montrons que la morphologie de l'embouchure de l'estuaire de la Seine est connue de manière partielle. La cartographie de la profondeur du socle mésozoïque, homogénéisée entre l'embouchure et la baie de Seine, est vérifiée par forage seulement dans la partie nord de l'embouchure de la Seine. La bordure sud étant également visualisée par sismique, seule la partie centrale de l'estuaire (profondeur du socle et nature des sédiments composant la zone) reste masquée.

- Du point de vue stratigraphique, au niveau des bordures nord et sud de l'estuaire ; la partie centrale observe un masque acoustique limitant l'observation de l'architecture sédimentaire à 1m.
- Du point de vue de l'architecture sédimentaire, l'ensemble des unités stratigraphiques ont été répertoriées. Quelques carottages permettent de calibrer la dynamique de remplissage de l'estuaire et de détailler l'évolution des conditions climatiques (sur les derniers 8500 ans) et des cycles de tempêtes (sur les derniers 3000 ans).
- Les différentes unités sismiques sont connues, mais la connaissance de leurs géométries à l'échelle de l'estuaire est incomplète. Les géométries des unités sont claires au nord et au sud de l'estuaire externe, ainsi qu'à l'ouest des bancs d'Amfard et du Ratier. En revanche, la partie centrale est occultée dès le premier mètre de profondeur par un masque acoustique, dont l'origine pourrait être liée soit à la présence de gaz d'origine biogénique et/ou la succession de niveaux sableux à grossier. La géométrie de la partie interne de l'estuaire n'est pas visible en sismique THR, mais peut être approché via la compilation des données bathymétrique acquises depuis 1834.

Sur les cinq premiers mètres de remplissage de l'estuaire, certaines zones (Banc du Ratier, partie nord-ouest de l'estuaire) ont conservé des points durs (niveau de gravier et/ou galet). Cependant, du fait des dynamiques de transport, d'érosion et de dépôt depuis les années 2000, nous avons une connaissance partielle de la nature des sédiments de fond ainsi que de leur évolution sur les cinq premiers mètres, excepté au nord de l'estuaire.

## 2. Perspectives

Le projet PSES a permis de faire un état des lieux général des connaissances géologiques de l'estuaire de la Seine à partir des données sismiques, de carottage et de bathymétrie historique. Il a permis de mettre en évidence des zones où la morphologie du socle Mésozoïque et la géométrie des dépôts Holocène associée étaient inconnues malgré ce set de données. Sur la nature des sédiments superficiels, l'étude souligne des zones où les cartes et données de carottage prélevées en 2002-2003 sont dépassées. Ce manque de connaissance fait écho au projet ICES où l'étude pointe l'acquisition de nouvelles données concernant la nature, l'âge, les modalités de dépôt des sédiments en profondeur et en lien avec les crises climatiques passées (Tessier, 2012).

Pour aller plus loin dans une perspective de prédiction et de mise à jour des données sédimentaires de l'estuaire de la Seine, deux approches de prélèvement ont été abordées :

- La première approche s'appuie sur l'identification de 6 zones cibles de carottage long (15-20mètres) réparties sur l'ensemble de l'estuaire externe (Figure 28). Les objectifs de ces cibles visent à mieux contraindre la morphologie du socle ainsi que la profondeur du toit des graves de fond. Elles visent également à vérifier l'extension des niveaux riches en matière organique (U2, U3 et U4). Il s'agit également d'expliquer l'origine du gaz biogénique masquant les signaux des campagnes sismiques, et de traverser les successions sédimentaires au droit probable de l'épaisseur maximum du prisme. Les cibles les plus externes (Parfond et Rade du Carosse) doivent nous permettre de récupérer des archives qui ont préservé, sans hiatus important, une grande partie de l'histoire (au moins les derniers siècles) de la construction du prisme. Le coût de cette campagne est estimé en 2024 à 600 000 – 700 000 euros (voir annexe 3 pour les devis).
- La seconde approche s'appuie sur la mise à jour des connaissances des sédiments sur les cinq premiers mètres de profondeur et impliquerait un échantillonnage plus important. L'usage d'un vibro-carottier est privilégié pour cette approche et serait moins onéreux que la première. Les données acquises permettraient de calibrer les modèles morpho-hydro-sédimentaires. Pour la zone sud, en érosion et mettant à l'affleurement l'unité U4, un accès plus direct au remplissage anté-2500 ans serait envisageable. C'est sans doute la perspective la plus simple et immédiate que l'on peut envisager dans la continuité du projet PSES.

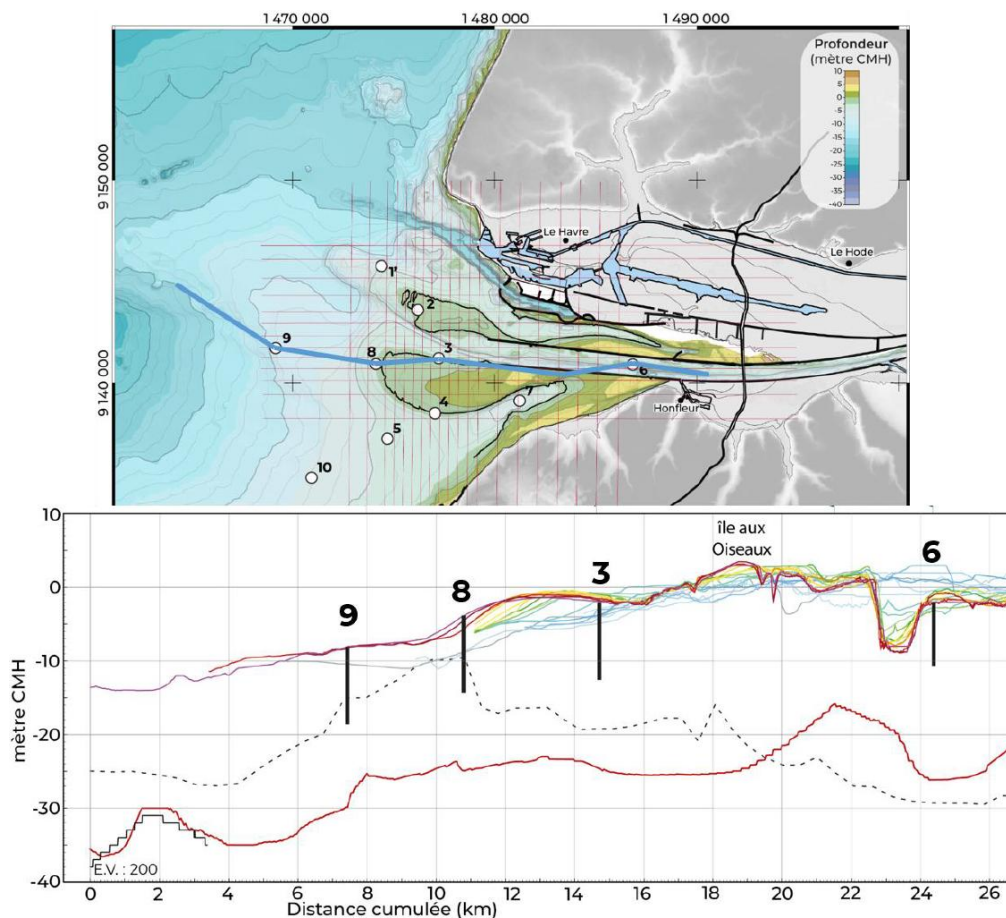


Figure 28 : Identification de 6 zones cibles de carottage long.

# BIBLIOGRAPHIE

- Alduc, D., 1979. La Manche Orientale étude géomorphologique du réseau des paléovallées, Caen, 146 pp.
- Auffret, J.P. and Alduc, D., 1977. Ensembles sédimentaires et formes d'érosion du Quaternaire sous-marin de la Manche Orientale. Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire, 53(4): 71-75.
- Auffret, J.P., Alduc, D. and Larsonneur, C., 1980b. La Manche Orientale: Paléovallées et bancs sableux. BRGM-CNEXO.
- Auffret, J.P., Alduc, D., Larsonneur, C. and Smith, A.J., 1980a. Cartographie du réseau des paléovallées et de l'épaisseur des formations superficielles meubles de la Manche Orientale. Annales de l'Institut Océanographique, 56: 21-34.
- Auffret, J.P. and d'Ozouville, L., 1985. Cartographie du prisme sédimentaire Holocène en baie de Seine orientale, par sismique réflexion à haute définition, Greco "Manche", Caen, pp. 53-57.
- Avoine, J., 1986. Sediment exchanges between the Seine estuary and its adjacent shelf. Journal of the Geological Society, London, 144: 135-148.
- Avoine, J., Allen, G.P., Nichols, M., Salomon, J.C. and Larsonneur, C., 1981. Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France: effect of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology. Marine Geology, 40: 119-137.
- Avoine, J., Hamm, L. and Migniot, C., 1996. Evolution des fonds de l'estuaire de la Seine entre 1974 et 1994: Synthèse, Service Technique Central Ports Maritimes et Voies Navigables.
- Benabdellouahed, M., 2011. La Seine fluviale plio-quaternaire en baie de Seine : évolution morphologique et sédimentaire (rôle du substratum géologique et des cycles climato-eustatiques). Thèse de Doctorat, Université de Caen.
- Benabdellouahed, M., Dugué, O., Tessier, B., Thinon, I. and Guennoc, P., 2013. Evolution pléistocène de la Seine fluviale préservée en Baie de Seine Quaternaire, 24(3).
- Benabdellouahed, M. et al., 2014. Nouvelle cartographie du substratum de la baie de Seine et synthèse géologique terre-mer : apports de nouvelles données sismiques et biostratigraphiques. Géologie de la France, 1: 21-45.
- Billeaud, I., Tessier, B. and Lesueur, P., 2009. Impacts of Late Holocene rapid climate changes as recorded in a macrotidal coastal setting (Mont Saint-Michel Bay, France). Geology, 37: 1031-1034.
- Bizien, H. and Donnard, C., 1994. Etude hydrodynamique et sédimentaire de l'estuaire de la Seine, Laboratoire de géomorphologie, Dinard.
- Chapalain, M., 2019. Dynamique des matières en suspension en mer côtière: caractérisation, quantification et interactions sédiments/matière organique. Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, 348p.
- Crowell, M., Leatherman, S.P. and Buckley, M.K., 1991. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. Journal of Coastal Research, 7: 839-852.
- Cuvilliez, A., Deloffre, J., Lafite, R. and Bessineton, C., 2009. Morphological responses of an estuarine intertidal mudflat to constructions since 1978 to 2005: The Seine estuary (France). Geomorphology 104: 165-174.
- Delibrias, G. and Guilcher, M.T., 1971. The sea level on the Atlantic coast and the Channel for the last 10,000 years by the  $^{14}\text{C}$  method. Quaternaria, 14: 131-135.
- 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, Caen, 179+14 pp.
- Dubrulle-Brunaud, C., 2007. Les sédiments fins dans un système macrotidal actuel (continuum Seine-Baie de Seine): caractérisations géochimiques et minéralogiques, identification des sources. Thèse de doctorat de l'Université de Rouen: 342p.
- Foussard, V. et al., 2010. Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours. Fascicule Seine-Aval, 2-3: 1-44.



- Frouin, M., Sebag, D., Durand, A. and Laignel, B., 2010. Palaeoenvironmental evolution of the Seine River estuary during the Holocene. *Évolution paléoenvironnementale de l'estuaire de Seine au cours de l'Holocène*. Quaternaire, 21(1).
- Garnaud, S. et al., 2003. Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner-shelf setting (eastern Bay of the Seine, France). *Marine Geology*, 202: 33-54.
- Hoyez, B. and Cuvilliez, A., 2001. La grande vasière de l'estuaire de la Seine: Typologie et cartographie. *Bulletin Trimestriel de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre*, 88(1): 36+1 carte.
- Huault, M.F. and Lefebvre, D., 1974. Le Postglaciaire de la Basse-Seine: Sédiments et chronostratigraphie. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, 40-41(3-4): 253-256.
- Huault, M.F. and Lefebvre, D., 1984. Le marais Vernier durant l'Holocène. *Bulletin du Centre de Géomorphologie*, 29: 7-17.
- Larsonneur, C., 1971. Manche centrale et baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles. de 3ième cycle Thesis, de Caen, Caen, 394+16 pp.
- Lefebvre, D. et al., 1974. Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine: Synthèse sédimentologique, stratigraphique et paléogéographique. *Bulletin d'information des géologues du Bassin de Paris*, 39: 27-36.
- Lefebvre, D., Huault, M.F., Occhietti, S., Pichet, P. and Breton, G., 1991. Datations de sédiments littoraux quaternaires du sous-sol de la place Gambetta, le Havre. In: B.d.C.d. Géomorphologie (Editor), *Journées Lennier, Quaternaire et préhistoire des métropoles normandes*, pp. 7-15.
- Lemoine, J.P., 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.
- Lemoine, J.P. et al., 2015. Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine. *Fascicule Seine-Aval 3.3*: 64p.
- Lesourd, S., 2000. Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal: zoom temporel du siècle à l'heure; application à l'estuaire de la Seine, Caen, Caen, 280+20 annexes pp.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Fisson, C. and Dauvin, J.-D., 2016. Sediment evolution in the mouth of the Seine estuary (France): A long-term monitoring during the last 150 years. *Comptes Rendus Geoscience*, 348: 442-450.
- Michel, J.P., 1968. Etude sédimentologique des forages dans l'estuaire de la Seine: Port du Havre. *Bulletin Trimestriel de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre*, 58: 9-17.
- Mitchum, J.R., Vail, P.R. and Sangree, J.B., 1977. Stratigraphic interpretation of seismic reflection pattern in depositional sequences. In: C.E. Payton (Editor), *Seismic stratigraphy. Applications to hydrocarbon exploration*, pp. 117-134.
- Muntoni, M. and Lemoine, J.P., 2022. CAPNORD : Caractérisation des évolutions hydro-morpho-sédimentaires et écologiques du secteur de la fosse Nord depuis la construction de Port 2000. *GIP Seine-Aval*: 55p.
- Paquet, F. et al., 2023. The Central English Channel throughs: major source-to-sink remnants or giant tidal scours? *Marine and Petroleum Geology*, 153: 106303.
- Raout, F., 1996. Le Havre - Projet port 2000 - étude de la propagation de houles - Baie de Seine, Service Technique Central des Ports Maritimes et Voies Navigables.
- Rieb, G., 1999. Etude de l'évolution historique du littoral sud et de ses petits fonds marins entre Deauville et Honfleur, CETMEF, Plouzané.
- Sebag, D., 2002. Apports de la matière organique pour la reconstitution des paléoenvironnements holocènes de la basse vallée de la Seine : fluctuations des conditions hydrologiques locales et environnements de dépôt. Thèse de Doctorat de l'université de Rouen: 356p.
- Sechi, S. et al., 2010. The last millennia history of detrital sedimentation in the Lower Seine Valley (Normandy, NW France): review. *Terra Nova*, 22.
- Sorrel, P. et al., 2012. Persistent non-solar forcing of Holocene storm dynamics in coastal sedimentary archives. *Nature Geoscience*.

- Sorrel, P., Tessier, B., Demory, F., Delsinne, N. and Mouazé, D., 2009. Evidence for millennial-scale climatic events in the sedimentary infilling of a macrotidal estuarine system, the Seine estuary (NW France). *Quaternary Science Review*, 28: 499-516.
- Ters, M., 1973. Les variations du niveau marin depuis 10000 ans, le long du littoral Atlantique français, *Recherches sur le quaternaire marin*. INQUA, Christchurch, pp. 114-135.
- Tessier, B., 2002. GEOSEINE 2 cruise, RV Cote D'Aquitaine, <https://doi.org/10.17600/2410010>
- Tessier, B., Lesueur, P., Haquin, S., Lelong, F., 2011. Carottage dans le chenal « environnemental » (Estuaire de la Seine, Pont de Normandie). Rapport de mission pour le port du Havre : 1-20.
- Tessier, B., Billeaud, I., Sorrel, P., Delsinne, N. and Lesueur, P., 2012. Infilling stratigraphy of macrotidal tide-dominated estuaries. Controlling mechanisms: Sea-level fluctuations, bedrock morphology, sediment supply and climate changes (The examples of the Seine estuary and the Mont-Saint-Michel Bay, English Channel, NW France). *Sedimentary Geology*, 279: 62-73.
- Tessier, B., Delsinne, N. and Sorrel, P., 2010. Holocene sedimentary infilling of a tide-dominated estuarine mouth. The example of the macrotidal Seine estuary (NW France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 181(2): 87-98.



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

Pellen R., Tessier B., Lesourd S., 2024. *Prisme Sédimentaire de l'Estuaire de la Seine*. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 7, 50 pp.

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

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

Le GIP Seine-Aval est financé par

