

# Caractérisation des variations lithologiques saisonnières des sédiments de la baie de Seine orientale ; impact des crues de la Seine (France)

Sébastien Garnaud\*, Patrick Lesueur, Sandric Lesourd, Nicole Poupinet, Jean-Claude Brun-Cottan

« Morphodynamique continentale et côtière », UMR 6143, CNRS/université de Caen, 24, rue des Tilleuls, 14000 Caen, France

Reçu le 8 octobre 2001 ; accepté le 8 janvier 2002

Présenté par Jean Dercourt

---

**Abstract – Characterisation of seasonal lithological variations of the superficial sediment in the eastern part of the Bay of Seine: impact of floods Seine River (France).** This paper presents the first results obtained during cruises since 1995 in the southeastern part of the Bay of Seine. New sedimentological data concerning sediment samples, box cores and water column measurements have been obtained recently in the framework of the Research Programme PNEC (French National Coastal Environment Programme). Fine sediments are deposited on form of temporary veneers of fluid-to-soft mud formed during high floods episodes. In the subtidal area (< 10 m water depth), mobility of fine sediments is important and temporary mud deposited during high discharge period composes part of the distal estuarine system of the Seine River. **To cite this article:** *S. Garnaud et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 323–330.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

sedimentology / seasonal evolution / mud deposit / floods / turbidity maximum / eastern part of the Bay of Seine / France

**Résumé –** Les premiers résultats des études sédimentologiques réalisées depuis 1995 sur le matériel superficiel de la baie de Seine sud-orientale sont présentés. Dans le cadre des travaux du PNEC « Baie de Seine », plusieurs campagnes en mer ont permis d'acquérir et d'interpréter de nouvelles données issues de prélèvements par bennes, de carottages et de mesures hydrosédimentaires dans la colonne d'eau. La sédimentation fine actuelle, sous forme de placages éphémères de vases, est fortement liée à certaines phases de crue de la Seine. Dans les petits fonds concernés (moins de 10 m de profondeur d'eau), la mobilité de la fraction fine des sédiments déposés est toutefois importante ; il en résulte une vaseuse subtidale temporaire, formant, en période de forts débits fluviaux, une partie distale du système estuarien de la Seine. **Pour citer cet article :** *S. Garnaud et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 323–330.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

sédimentologie / évolution saisonnière / dépôts de vase / crues / bouchon vaseux / baie de Seine orientale / France

---

## Abridged version

### 1. Introduction

Most present-day continental shelves under temperate climates are covered with relict sands and gravels [8]. However, various sites of fine-grained sediment accumulation are often found either on the middle shelf or on the inner shelf [4, 5, 15]. On the western margin of the United States, recent studies showed that floods from the Eel River [20]

and the Russian River [7] could create episodic flood deposits on the inner continental shelf. One of the targets of the PNEC (French National Coastal Environment Programme) 'Baie de Seine' is to study the origin and the evolution of temporary settled fine-grained deposits. This article is devoted (i) to complete hydro-sedimentary data into a macrotidal estuarine system, (ii) to update mapping of the modern distribution of the superficial sediment cover, and (iii) to characterise and understand the main mechanisms involved in temporal and spatial distribution of fine sedi-

---

\* Correspondance et tirés à part.  
Adresse e-mail : garnaud@geos.unicaen.fr (S. Garnaud).

ment in the short-term (i.e., seasonal flood deposits) and medium-term (which lasts several years, i.e., between 1995 and 2000).

## 2. Study site and methods

Sediment distributions into the Bay of Seine have been investigated since 1970 [1, 10, 18]. However, distribution of muddy sands and sandy muds between depths of 5 and 20 m show extreme spatio-temporal variations. For example, ephemeral veneers of fluid-to-soft mud have been described off Villers-sur-Mer [2, 3, 14], but the mechanisms governing the erosion and the transport of these deposits were not well understood. Thus, the aim of this paper is to focus mainly on the fine-grained deposit off Villers-sur-Mer (Figs. 1 and 2).

The mean discharge of the Seine is  $420 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (1941–1999) but river flow varies seasonally from a maximum of  $2300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  during very high flows to a minimum  $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Tidal range reaches 7.5 m during spring tides; maximum surface tidal currents in the eastern part of the Bay of Seine do not exceed  $1.1 \text{ m s}^{-1}$ .

Spatial distribution and temporal variations of the superficial sediment were described in the eastern part of the Bay of Seine by using (i) repetitive superficial sediment grab samples and box cores, located using a DGPS and collected during four cruises from 1998 to 2000 (more than 700 samples), (ii) water column measurements of salinity, temperature and suspended sediment concentration. Grain sizes and fine-grained contents ( $< 50 \mu\text{m}$ ) in sediments were obtained with a Laser Coulter LS 230. The grain-size statistical parameters were calculated using sand and gravel fractions. Vertical profiles of salinity, temperature and suspended particulate matter (SPM) were obtained during a semi-diurnal tidal cycle, using a CTD recorder with an OBS and an ADP to characterise the water column structure at the reference station (Fig. 1) during six conditions of river discharge and tidal amplitude.

## 3. Results

An inshore/offshore sediment distribution was observed seaward of the eastern part of the Bay of Seine, with coarser sediments in the deeper western area (mean grain-size  $800\text{--}1000 \mu\text{m}$ ) and finer sediments (mean grain-size between  $100$  and  $200 \mu\text{m}$ ) on the shallower eastern stations towards the coast (Fig. 1). Extensive sediment sampling in February 2000 in the eastern part of Bay of Seine allowed mapping the fine-grained deposits (Fig. 2). Muddy fine sand (silt/clay content  $> 15\%$ ) appears along the coast of Calvados and constitutes most of the subtidal ebb-tidal prism of the Seine. Spatial distribution of fine sediment shows four distinct areas: (1) the mouth of the Dives river, (2) the Ratier bank, (3) the dredge dumping area off Ouistreham and (4) the subtidal mud patch between Villers-sur-Mer and Deauville. Off Cabourg, at a depth of between  $-4$  and  $-7$  m, Holocene clay [1, 19] outcrops, or is present under a thin ( $< 20$  cm thick) mobile covering of shelly sands (Fig. 3).

From 1998 to 2000, temporal variations in fine sediment distribution were studied along two inshore/offshore transects between Deauville and Villers-sur-Mer (Fig. 2), during various seasonal conditions (Fig. 4b). At each survey, sediment sampling provided an overall image of the distribution of the fine sediment cover along the transects (Fig. 4a). Deposition and erosion periods have occurred alternately since September 1998. In the shallow water area, when the maximum river flow occurred in March 1999 ( $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , Fig. 4b), veneers of fluid-to-soft mud were very extensive, reaching 5 cm in thickness at the seabed at some sites (Fig. 3). Superficial deposits contained more than 25% of fine-grained particles. The winter mud deposits were partially redistributed, resulting in a drift toward the coast and a reintroduction into the Seine Estuary [12]. In February 2000, a cruise was conducted in the studied area during higher river flow conditions (i.e., discharges  $> 2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , Fig. 4b). Despite these conditions, the impact on the veneer of flood mud deposit was inferior (Fig. 4a). Subsequently, a part of the fine-grained sediment fraction was mixed with autochthonous fine sands. This tendency led to a residual increase in the mud content of the sand cover, seaward of the Seine Estuary.

Despite hydrodynamics conditions, comparison with an earlier survey (i.e., February 1995, Fig. 5) suggests a medium-term preservation of a part of the fine sediment in the superficial cover of the eastern part of the Bay of Seine (3% in January 1995 and 35% in May 1999).

During high river flow and intense spring tides (March 1999), at the reference station (Fig. 2), salinity was generally less than 24 PSU during the BM + 1 to BM + 3 period, and suspended sediment concentrations were high ( $50 \text{ mg l}^{-1}$ ) [9]. Grain-size distribution of SPM in adjacent waters and veneers of fluid-to-soft mud deposits were similar, which confirms the contribution of the Seine to the veneer of flood mud deposit.

## 4. Interpretation, discussion and conclusion

Particles transported seaward by the Seine River plume during seasonal peak discharges are deposited in the eastern part of the Bay of Seine, as observed in March 1999. In spite of a major flood in February 2000, mud deposits were not so important as in March 1999. Indeed, most of the fine sediments present in the Seine River plume were certainly expelled during the 1999 flood and/or dispersed at greater depth on the shelf, due to the high intensity of the inflow. Thus, mud deposits observed on the inner shelf after Seine floods depend on (1) the amount of mud supplied from the estuary, in relation to the lifetime of the preceding annual river flow, (2) the lifetime and intensity of the high-water inflow.

This study provides new data concerning the high-frequency variations on fine deposits in the eastern part of the Bay of Seine. These data are needed to understand estuary-shelf interrelationships [13]. One of the most significant results of this study is the seasonal increase in the fine-grained sediment cover caused by temporary ve-

neers of fluid-to-soft mud deposits such, like it occurred in March 1999. This flood deposit is likely to be ephemeral and flood-derived sediments are instead rapidly and widely dispersed over the coastal area, or reintroduced in the estuary. Comparison of the superficial sediment distribution of fine sediment area (i.e., silt/clay content > 5%) investigated in February 2000 with those observed in February 1995 shows that these mud zones not only persist but also expand with time. Inner-shelf mud zones show an increase due to mixing of both river SPM output and erosion of subtidal relict clays with shelf sands.

These variations in the superficial sediment of the Bay of Seine can be explained by three major hydrodynamical and meteorological conditions that control fine-grained sediment behaviour: (1) macrotidal currents dominated by flood-tides that reshape and redistribute the sediments, (2) the Seine hydrodynamic regime that contributes to fine sediment deposition after high river flows, when the 'Seine turbidity maximum' is expelled, (3) wind effects creating waves that trigger sediment re-suspension in shallow waters and favour the dispersion of fine-grained sediments.

## 1. Introduction

Du fait de l'héritage des apports glaciaires pléistocènes et des modestes apports fluviaux argileux auxquels ils sont soumis, la plupart des plateaux continentaux actuels sous climat tempéré sont recouverts de sables et graviers reliques [8]. Les sites privilégiés pour l'accumulation de sédiments fins tels que les sables très fins et les pélites (silts et argiles < 50 µm) sont variés, mais restent le plus souvent localisés dans la partie médiane des plateaux continentaux ouverts [15, 16]. Des dépôts éphémères de vases sont décrits sur la plate-forme interne de la Gironde [4, 5, 15], tandis que des études récentes (programme Strataform) sur la marge ouest des États-Unis, au débouché de l'Eel River [20] et de la Russian River [7], montrent que la présence de sédiments fins dans des environnements de proche plate-forme interne peut résulter de dépôts épisodiques de crues (*flood deposit*).

En Manche, les sédiments fins se cantonnent aux secteurs de baies abritées et d'estuaires [1, 10, 13, 18]. Toutefois, malgré l'énergie hydrodynamique intense (régime macrotidal et faibles profondeurs d'eau), des dépôts fins sont couramment échantillonnés en baie de Seine, comme en Manche. De plus, l'étendue des secteurs envasés s'est significativement accrue en baie de Seine au cours des trois dernières décennies [2, 11, 14].

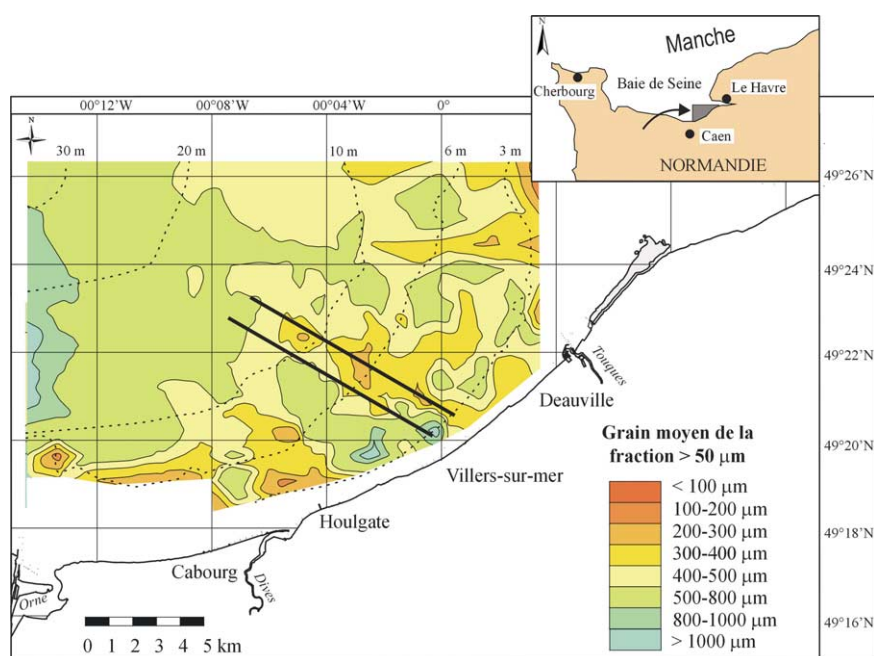
Dans le cadre des actions de recherche du Programme national sur les environnements côtiers (PNEC) «Chantier baie de Seine», l'étude des petits fonds ouverts, voisins des côtes du Calvados, a été entreprise, afin de caractériser l'origine et l'évolution des sédiments fins aux échelles de temps saisonnière et pluriannuelle. Plusieurs campagnes récentes en mer (campagnes Benthoseine 1998 et 1999, Vastedeba 2000) ont permis la reconnaissance des sédiments superficiels et la répétition de leur échantillonnage au cours de différentes périodes de l'année et par différentes conditions hydrologiques de la Seine (étiage et crue). Les objectifs de cette reconnaissance des fonds subtidiaux (< 10 m) étaient (i) de compléter la com-

préhension du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire interne [11, 13], (ii) de comparer nos données avec celles acquises antérieurement par l'université de Caen avec des moyens analogues (données de 1995) et (iii) de caractériser et de comprendre la mobilité de la fraction pélique à l'échelle saisonnière (court terme) et pluriannuelle (moyen terme).

## 2. Site d'étude, problématique et méthodes

Avant 1990, plusieurs campagnes de reconnaissance [1, 10, 18] avaient permis de cartographier les fonds subtidiaux de la baie de Seine, constitués de matériel grossier d'âge Quaternaire, généralement sablo-graveleux ou caillouteux et comprenant une importante fraction bioclastique d'âge Holocène à Actuel [10]. Les dépôts fins (< 50 µm) associés à cette couverture sédimentaire y sont, (i) soit piégés dans les sédiments grossiers hétérométriques, phénomène souvent accentué si la densité faunistique est importante [17], (ii) soit en situation de recouvrement temporaire de sables homogènes fins à moyens [1]. En baie de Seine sud-orientale, des travaux antérieurs [3, 14] avaient montré, au large de Villers-sur-Mer, la présence éphémère de vase fluide en placages sur les sables, conduisant à qualifier ce secteur de «vassière subtidale temporaire». L'origine et les processus de transport concernant les particules fines déposées en ce site étaient cependant jusqu'à présent mal connus. La présente étude porte sur ce secteur, qui est fortement sous l'influence de la Seine et seulement peu sous celle des trois fleuves côtiers du Calvados (l'Orne, la Dives, la Touques).

La baie de Seine orientale est soumise à l'influence fluviale de la Seine, dont le débit moyen annuel est évalué à 420 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (1941–1999), avec des débits instantanés compris entre 40 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> en étiage et 2300 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> lors des crues exceptionnelles. L'amplitude de la marée atteint 7,5 m en moyennes vives-eaux, mais les courants de marée dans le secteur sud-



**Figure 1.** Répartition du grain moyen de la fraction supérieure à 50 µm des sédiments superficiels de la partie orientale de la baie de Seine. Bilan des missions Benthoseine 1998, 1999 et Vastedeba 2000; en trait noir, au large de Villers-sur-Mer, les deux radiales de prélèvement suivies.

**Figure 1.** Distribution of the mean grain-size higher than 50 µm of seabed sediments samples collected over the eastern part of the Bay of Seine (cruises BENTHOSEINE 1998, 1999 and VASTEDEBA 200); Continuous line: two inshore/offshore sampling transects off Villers-sur-Mer.

oriental étudié sont cependant faibles, au maximum de 1,1 nœud en surface. Les houles du large pénètrent peu dans cette zone protégée de la baie de Seine, mais l'agitation par les vents locaux et les tempêtes hivernales de secteur nord-ouest est ressentie [10].

Le suivi spatio-temporel de l'évolution de la fraction fine des sédiments a été réalisé grâce à la répétition de l'échantillonnage sous différentes conditions hydrodynamiques durant plusieurs années (plus de 700 prélèvements au total). Pour cela, une benne Shipeck et un carottier court de type Reineck ont été utilisés en des points positionnés au DGPS et régulièrement espacés sur des radiales littoral-large (Fig. 1). La fraction fine (inférieure à 50 µm) présente dans le sédiment total a été mesurée par microgranulométrie laser (Coulter LS 230) et la moyenne granulométrique du sédiment a été calculée sur la fraction supérieure à 50 µm (c'est-à-dire la fraction sableuse coquillière).

Des mesures hydro-sédimentaires ont été réalisées au niveau de six points fixes par des conditions d'agitation modérée du plan d'eau, pendant un cycle de marée semi-diurne (13 h), en combinant différents débits de la Seine et différents coefficients de marée. Pour cela, une sonde multi-paramètres (sonde Seabird CTD, *Conductivity Temperature Depth*, équipée d'un turbidimètre OBS, *Optical Back Scatter*) et un courantomètre à effet Doppler (ADP Sontek, *Acoustic Doppler Profiler*) ont permis de mesurer profondeur, température, salinité, concentration en matières en suspension (MES) et vitesse et direction des courants.

### 3. Résultats

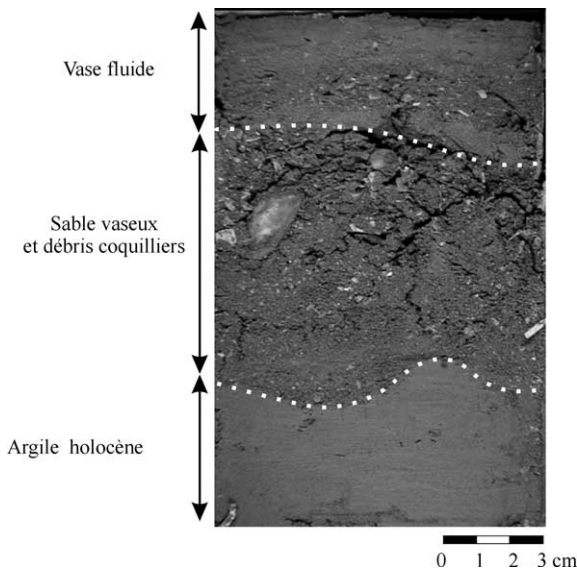
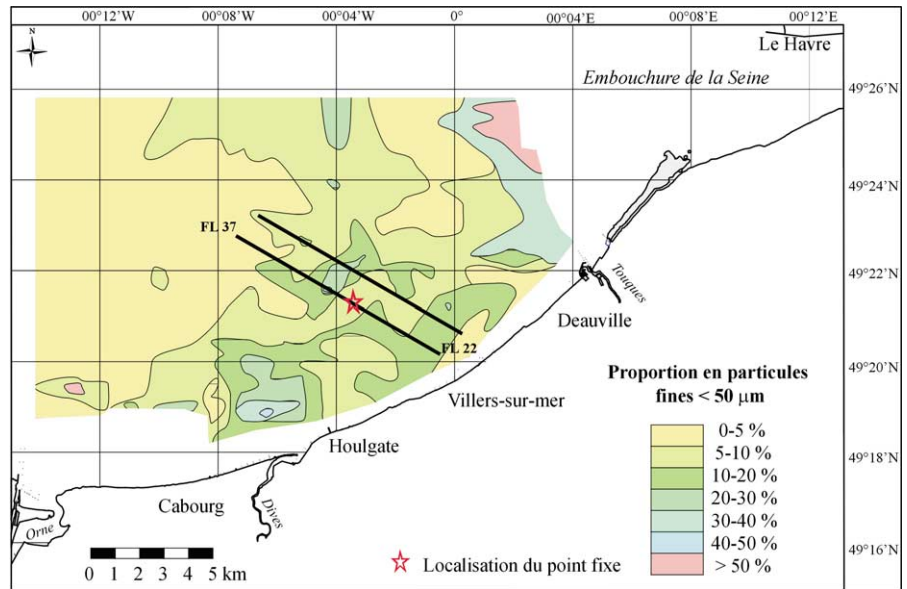
#### 3.1. Couverture sédimentaire de la baie de Seine orientale

La cartographie des fonds de la baie de Seine orientale, réalisée depuis 1998, montre un gradient d'affinement des sédiments du large (grain moyen 800–1000 µm) vers la côte (grain moyen compris entre 100 et 200 µm), en accord avec les résultats de Larssonneur [10] à l'échelle de la baie de Seine (Fig. 1). Au nord-ouest, les sables moyens du large dominent et font la transition avec les dépôts graveleux de l'Ouest de la baie de Seine. Ils passent progressivement à des sables fins vers le littoral du Calvados. Ces sables fins coquilliers couvrent l'ensemble de la baie de Seine orientale entre les isobathes 0 et –10 m des cartes marines (CM). Des ensembles sablo-vaseux, marqués par des teneurs en particules fines supérieures à 15%, s'individualisent, parmi lesquels les abords du prisme d'embouchure de la Seine (Fig. 2). En baie de Seine sud-orientale, ces secteurs géographiquement distincts, soumis au dépôt de particules fines, sont, d'une part, les fonds connexes des embouchures fluviales (Seine, Dives, Orne et dépôt de dragages du port de Ouistreham) et, d'autre part, les fonds au large de Villers-sur-Mer et Deauville (Fig. 2).

Au large de Cabourg, les fonds subtidiaux sont recouverts d'une faible épaisseur de sédiments actuels [1], le substrat holocène affleurant fréquemment entre –4 et –7 m CM sur une vaste zone côtière de l'ordre de 45 km<sup>2</sup>. Ce substrat relique, de haut ni-

**Figure 2.** Répartition hivernale de la proportion en pélites (< 50 µm) dans le sédiment total de la baie de Seine orientale (février 2000). En trait noir, entre Deauville et Houlgate, les deux radiales suivies en janvier 1995, septembre 1998, mars 1999, mai 1999 et février 2000 ; à l'ouest, la radiale FL37–FL22 citée dans la Fig. 4a.

**Figure 2.** Distribution of the silt and clay (< 50 µm) content in the superficial sediments in February 2000. Continuous line: two inshore/offshore transects between Deauville and Villers-sur-Mer as studied during five cruises (January 1995, September 1998, March 1999, May 1999 and February 2000).



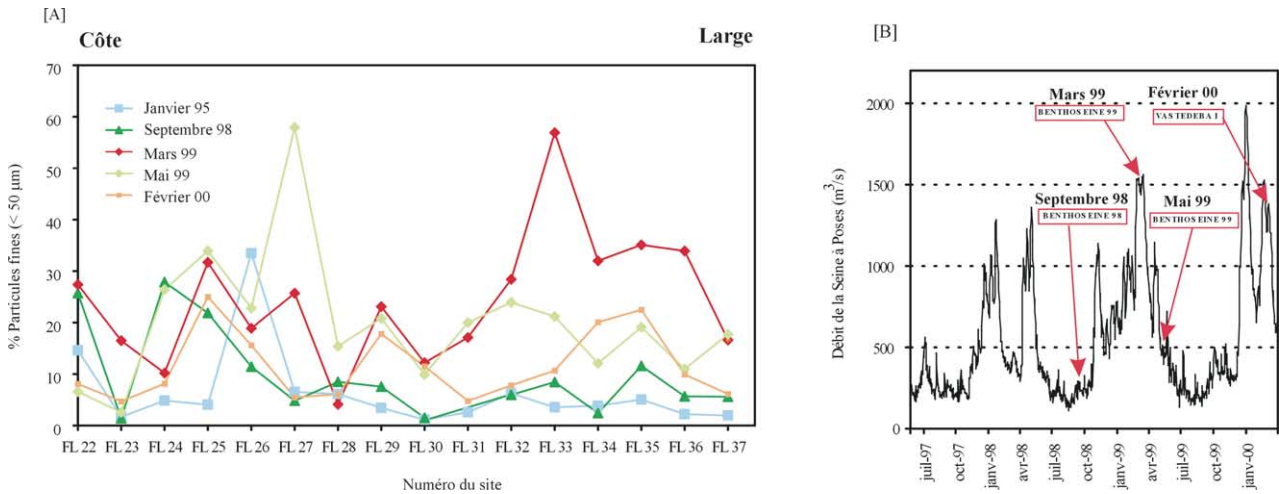
**Figure 3.** Exemple de carotte Reineck prélevée en mars 1999 sur le site du point fixe (Fig. 2). On observe trois niveaux : une vase molle superficielle (2–3 cm), un sable vaseux contenant des coquilles brisées (6 cm) et des argiles holocènes. Une datation récemment obtenue sur un débris de bois interlité dans cette argile indique un âge d'époque boréale (6530 BP ± 100 ans, datation <sup>14</sup>C réalisée au Centre d'études nordiques de l'université de Laval, Québec).

**Figure 3.** Box-core sampled in March 1999 at reference station (Fig. 2). Three generations of sediments can be distinguished: (1) veneers of fluid-to-soft mud 2–3 cm, (2) muddy shelly sand, and (3) Holocene clayey substrate. Recent <sup>14</sup>C dating at the 'Centre d'études nordiques de l'université de Laval', Québec, has given an age of 6530 BP ± 100 yr based on a fragment of wood.

veau marin, est une argile gris bleuté (Fig. 3), avec de nombreuses passées organiques, voire tourbeuses, dont l'érosion doit contribuer à l'alimentation du domaine subtidal en particules fines [1, 19].

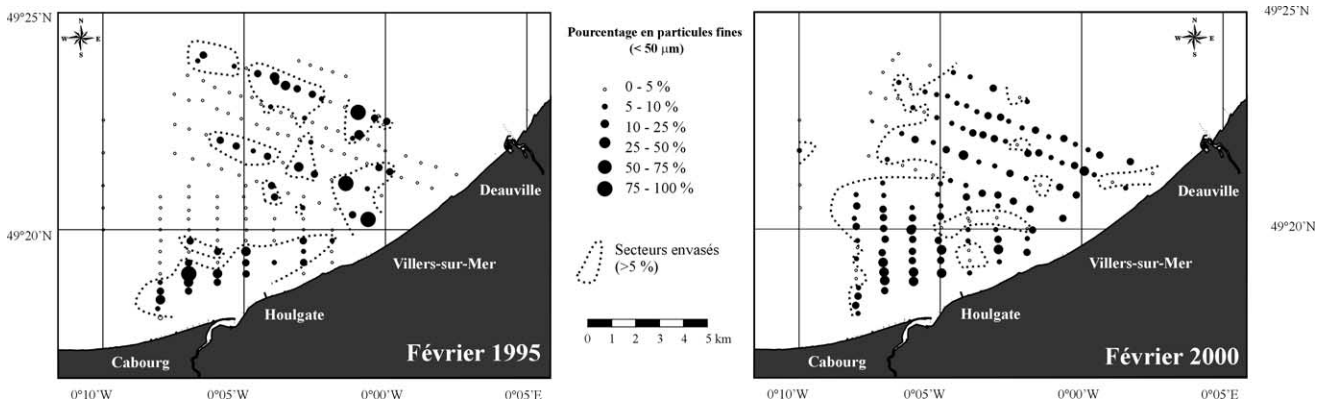
### 3.2. Évolution spatio-temporelle de la vasière temporaire subtidale

L'échantillonnage des deux radiales perpendiculaires au littoral (Figs. 2 et 4a) a permis d'identifier, sous certaines conditions, des placages de vases fluides de type crème de vase sur les sables fins et moyens. Le suivi des radiales en janvier 1995 (premier levé des échantillons), septembre 1998, mars 1999, mai 1999 et février 2000 montre une alternance d'épisodes d'envasement et de désenvasement à occurrence saisonnière (Fig. 4a). Au cours de ces cinq campagnes, l'envasement maximum a été constaté au mois de mars 1999 : moyenne des teneurs en particules fines de l'ordre de 25% sur l'ensemble des radiales, contre 6% en janvier 1995 (Fig. 4a). Des placages superficiels de vase fluide (crème de vase), atteignant localement 5 cm d'épaisseur, furent couramment carottés en mars 1999 (Fig. 3). Ces placages, reconnus en période de fin d'hiver, ne furent cependant pas entièrement préservés au cours des mois suivants, en raison de l'agitation de la mer sur ces petits fonds. Ainsi, en mai 1999, les dépôts préférentiels de vase se situaient plus près du littoral (Figs. 2 et 4a). Du fait de l'asymétrie des courants de marée (prédominance du flot), une autre partie des sédiments fins temporairement déposés a contribué, pendant ce temps, à la reconstitution du stock sédimentaire intra-estuarien de la Seine. Ce phénomène est particulièrement marqué en période d'étiage et de vives-eaux conjuguées [11, 13]. En février 2000 (Fig. 4a), la fraction fine contenue dans le sédiment n'atteignait, ni les valeurs de mars 1999, ni celles de mai 1999, à l'exception des points situés le plus au large, soulignant le caractère saisonnier de la sédimentation fine.



**Figure 4. a.** Évolution temporelle et spatiale du pourcentage en particules fines (< 50 μm) le long de la radiale FL37–FL22 (Fig. 2) sur le site atelier de la vasière temporaire subtidale au large des côtes du Calvados. **b.** Chronique du débit fluvial de la Seine depuis juillet 1997 et situation des dates des campagnes.

**Figure 4. a.** Time and spatial evolution of the silt and clay content of superficial sediments on transect FL37–FL22 (Fig. 2) on the subtidal mudpatch offshore the Calvados coast. **b.** Seine River discharge the during 1997–2000 period.



**Figure 5.** Évolution spatiale de l’envasement constaté entre Cabourg et Deauville entre février 1995 et 2000.

**Figure 5.** Spatial evolution of fine-grained particles (< 50 μm) between Cabourg and Deauville during the February 1995 and 2000 periods.

Les phénomènes hydrodynamiques à très haute fréquence (houles) et les dépôts de crue modifient fortement la répartition des sédiments fins au cours de l’année. Néanmoins, quelles que soient les conditions hydrologiques régnant lors des périodes d’échantillonnage (1995–2001), un envasement résiduel dans le secteur est constaté. Cette évolution pluriannuelle (moyen terme) de la fraction fine peut être montrée par comparaison avec des résultats obtenus au cours de deux campagnes effectuées durant le même mois d’hiver (février 1995 et 2000) et par des débits analogues de la Seine (Fig. 5). Entre ces deux situations, la moyenne des teneurs en pélites sur l’ensemble de la zone d’étude passe de 3% en 1995 à 35% en 2000. Toutefois, en 1995, l’envasement correspondait à des placages discontinus sur des sables dépourvus de frac-

tion fine, alors qu’en 2000, l’envasement était général sur le site.

La vasière subtidale de la baie de Seine sud-orientale montre donc des variations importantes dans les teneurs en pélites, aussi bien à l’échelle de temps infra-annuelle (court terme), que pluriannuelle (moyen terme, période 1995–2000). Les fluctuations lithologiques ont pour cause les modifications des apports en particules fines et la dynamique marine (agitation et courants de marée), sollicitant à la fois la fraction sableuse et les sédiments vaseux.

### 3.3. Suivis hydro-sédimentaires

Parmi les mesures hydro-sédimentaires en point fixe réalisées dans la zone d’étude, le résultat le plus remarquable fut obtenu en février 2000, par une combinaison de débits élevés de la Seine ( $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) et

de grandes vives-eaux (coefficient de marée de 107). Une arrivée d'eau douce très turbide pour le secteur ( $50 \text{ mg l}^{-1}$ ) et dessalée (24 PSS à basse mer, BM) affectait l'ensemble de la colonne d'eau entre BM + 1 et BM + 3 [9]. Lors de ces conditions exceptionnelles, le bouchon vaseux fut expulsé à plus de 15 km de l'embouchure, atteignant ainsi les côtes du Calvados. La similitude des paramètres granulométriques des MES de la couche turbide et de la crème de vase déposée, ainsi que les mesures réalisées en point fixe, montrent l'influence des apports de la Seine dans le domaine oriental de la baie. Cette contribution fluviale aux dépôts de particules fines en baie orientale a également été mise en évidence par le modèle hydrosédimentaire tridimensionnel SAM-3D récemment développé [6].

#### 4. Interprétation et discussion

Les travaux antérieurs dans cette région avaient montré des différences dans l'occurrence des zones de dépôt des vases. Ainsi, alors que dans l'embouchure de la Seine, les dépôts pélitiques avaient une extension maximale durant l'hiver 1981, l'envasement des fonds au large du Calvados se produisait plutôt au cours de l'étiage en 1982, en période de calme hydrodynamique [1, 3].

Nos résultats montrent que, sur le site choisi comme étant représentatif de la vasière subtidale de la baie de Seine sud-orientale, les principaux changements de la couverture sédimentaire sont en relation avec les apports de particules fines, à caractère saisonnier. Les vases fraîches qui recouvrent temporairement les sables fins et moyens de la proche plate-forme résultent de l'expulsion du bouchon vaseux de la Seine : ce fut le cas lors la longue crue hivernale 1998–1999, dont le débit soutenu avait atteint  $780 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en moyenne entre octobre 1998 et mars 1999 (période d'étude, Fig. 4b). Pendant cette période, les particules fines se déposèrent préférentiellement entre  $-10$  et  $-6$  m CM (vasière subtidale, Figs. 2 et 4a), profondeurs correspondant à une zone d'énergie turbulente minimale [10], entre la zone d'action dominante des vagues et celle des courants de marée. Toutefois, une partie des dépôts fins fut remise en suspension par l'action des houles de tempêtes qui ont redistribué ce matériel vers le littoral, conduisant à la formation d'une vasière pré-littorale entre  $-5$  et  $-2$  m CM.

En février 2000, malgré les débits très élevés de la Seine ( $> 2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , Fig. 4b), l'envasement des sites d'échantillonnage n'était pas aussi important qu'en mars 1999. Dans le même temps, des particules fines furent prélevées par 30 m de profondeur au droit de l'embouchure de la Seine, dans une dépression (le Parfond) qui est habituellement dépourvue d'envasement, du fait des forts courants de marée qui y rè-

gnent. Les deux missions réalisées lors de très forts débits instantanés de la Seine ( $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) en 1995 et 2000 montrent que les particules fines expulsées pendant ces conditions extrêmes sont entraînées plus au large de l'embouchure de la Seine et vers la plate-forme. Ces dépôts de crue, expulsés loin de l'embouchure, sont classiques ; on citera, par exemple le cas de l'Eel River (plate-forme californienne) [20]. La faible quantité de particules fines déposées après la crue de février 2000 comparée à celle de mars 1999, peut avoir une autre explication. En effet, une grande partie du bouchon vaseux de la Seine a été éjectée au large de la zone d'étude lors de la longue crue hivernale précédente (octobre 1998–mai 1999), sans reconstitution d'un stock important de sédiments fins estuariens lors de l'étiage précédant la crue de 2000.

Dans le cadre de ce suivi à haute fréquence de la sédimentation fine entre 1998 et 2000, l'envasement est davantage marqué après des crues moyennes, mais longues, que lors de pics de crues élevés, mais courts. L'envasement est donc conditionné par la durée et l'intensité de la crue hivernale, ainsi que par la quantité de matériel fin disponible, stockée dans le bouchon vaseux de l'estuaire de la Seine.

Toutefois, une source de particules fines autre que fluviale doit être considérée dans l'envasement accru observé à l'échelle pluriannuelle (Fig. 5). En effet, les carottages et les récents levés de sonar à balayage latéral (2000 et 2001) ont permis de préciser l'étendue et la morphologie des dépôts argileux holocènes au large de Cabourg. Ces argiles sont, soit affleurantes et affouillées par de nombreuses figures d'érosion, soit faiblement recouvertes de sables coquilliers (Fig. 3). Ce matériel fin érodé participe donc à l'envasement des sables de la baie de Seine orientale.

Les études récentes menées dans l'estuaire interne de la Seine [12, 13] ont montré : (i) une tendance à la translation vers l'embouchure du comblement de l'estuaire, qui s'accompagne d'un déplacement conforme des sédiments fins vers les petits fonds subtidaux, et (ii) de fortes fluctuations saisonnières de l'envasement de l'embouchure. Nos observations de la couverture sédimentaire de la baie de Seine sud-orientale sont cohérentes avec les résultats précédents, c'est-à-dire avec des variations spatio-temporelles saisonnières contrôlées par les mêmes forçages environnementaux, avec des apports rapides de sédiments fins en période de crue et une redistribution ultérieure des vases (post-crue et étiage).

#### 5. Conclusions

Cette étude est basée sur la reconnaissance à haute fréquence entre 1998 et 2000 des sédiments superficiels d'une plate-forme interne soumise à un régime macrotidal au cours de conditions hydrologiques et météorologiques distinctes.

En baie de Seine sud-orientale, une vasière subtidale se développe temporairement (court terme : saisonnier) sous la forme de placages diffus de matériel fin, souvent fluide, en recouvrement des sables. La distribution des sédiments superficiels est soumise à trois types d'agents hydrodynamiques et météorologiques principaux présentant des interactions complexes : (i) le régime macrotidal, dominé par le courant de flot, responsable d'une granodécroissance des sédiments du large vers la côte, (ii) le régime hydrologique de la Seine (intensité et durée des crues), auquel sont associés les apports de particules fines en période printanière, accrus lors de l'expulsion du bouchon vaseux après une période d'étiage prolongée, et (iii) la houle qui remanie et redistribue les sédiments fins déposés vers la côte.

**Remerciements.** Ces travaux ont été réalisés avec le soutien du SHOM et de la région Basse-Normandie, dans le cadre du Programme national des environnements côtiers (PNEC) « Baie de Seine ». Les campagnes ont été effectuées grâce à l'armement naval de l'Insu/CNRS (N/O *Côtes de la Manche*). La datation  $^{14}\text{C}$  a été réalisée au laboratoire du Centre d'études nordiques de l'université de Laval (Canada) sous la référence UL-2248. Les auteurs remercient S. Berné pour ses remarques constructives qui ont permis d'améliorer la qualité du manuscrit.

## Références

- [1] J. Avoine, L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire, thèse, université de Caen, 1981, 236 p.
- [2] J. Avoine, A. Caillot, R. Hoslin, C. Larssonneur, J. Massias, M. Quesney, Contribution des traceurs radioactifs à l'étude des mouvements sédimentaires en baie de Seine, La baie de Seine (Greco-Manche), université de Caen, 24–26 avril 1985, in : Actes de colloques n°4, Ifremer, 1986, pp. 211–218.
- [3] J. Avoine, L. Crevel, L. Dubrulle, D. Boust, P. Guegeniat, Sédiments et dynamique sédimentaire en baie de Seine, in : XVIII<sup>e</sup> journées de l'hydraulique, Marseille, 1984, pp. I.3.1–I.3.8.
- [4] J.-M. Bouchet, Distribution estivale des pélites dans les sédiments superficiels de la plate-forme Sud-Gascogne, in : Coll. Int. Océanol., Perpignan, 1987, pp. 21–22.
- [5] P. Castaing, Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes. Cas de la Gironde, thèse, université Bordeaux-1, 1981, 530 p.
- [6] P. Cugier, P. Le Hir, Modélisation 3D des matières en suspension en baie de Seine orientale (Manche, France), C. R. Acad. Sci. Paris, série IIa 331 (2000) 287–294.
- [7] D.E. Drake, R.W. Cacchione, Seasonal variation in sediment transport on the Russian River shelf, California, Cont. Shelf Res. 4 (1985) 495–514.
- [8] K.O. Emery, Relict sediments on continental shelves of world, Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 52 (1968) 445–464.
- [9] S. Garnaud, P. Lesueur, S. Lesourd, N. Poupinet, J.-C. Brun-Cottan, Répartition et évolution actuelles des sédiments fins en baie de Seine orientale : fluctuations dominées par les crues de la Seine, in : XXVII<sup>e</sup> colloque de l'Union des océanographes de France : écosystèmes côtiers, Lille, 2001, p. 65.
- [10] C. Larssonneur, Dynamique des suspensions et des dépôts en baie de Seine : une synthèse des résultats, La baie de Seine (Greco-Manche), université de Caen, 24–26 avril 1985, in : Actes de colloques n°4, Ifremer, 1986, pp. 93–108.
- [11] S. Lesourd, Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal : zoom temporel du siècle à l'heure ; application à l'estuaire de la Seine, thèse, université de Caen, 2000, 280 p.
- [12] S. Lesourd, P. Lesueur, J.-C. Brun-Cottan, J.-P. Auffret, N. Poupinet, B. Laignel, Morphosedimentary evolution of a macrotidal estuary subjected to human impact; the example of the Seine (France), Estuaries 6B (24) (2002) 940–949.
- [13] S. Lesourd, P. Lesueur, J.-C. Brun-Cottan, S. Garnaud, N. Poupinet, Seasonal variations in the characteristics of superficial sediments in a macrotidal estuary (the Seine inlet, France), Estuar. Coast. Shelf Sci. (accepté).
- [14] P. Lesueur, S. Lesourd, J.-P. Auffret, J. Avoine, J.-C. Brun-Cottan, F. Levoy, État des connaissances sur la distribution et l'évolution des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine, in : Programme scientifique Seine Aval, rapport final par laboratoire, thème : hydrodynamique et transport sédimentaire, rapport 1996/FIN-1, avril 1997, pp. 82–115.
- [15] P. Lesueur, J.-P. Tastet, L. Marambat, Shelf mud fields formation within historical times: exemples from offshore the Gironde Estuary, France, Cont. Shelf Res. 4 (16) (1996) 1849–1870.
- [16] I.N. McCave, Erosion, transport and deposition of fine-grained marine sediments, in : D.A.V. Stow, D.J.W. Piper (Eds.), Fine-Grained Sediments: Deep-Water Process and Facies, Blackwell Scientific Publications, 1984, pp. 35–69.
- [17] E. Thiébaud, L. Cabioch, J.-C. Dauvin, C. Retière, F. Gentil, Spatio-temporal persistence of the Abra Alba-Pectonaria Koreni muddy-fine sand community of the eastern Bay of Seine, J. Mar. Biol. Ass. UK 77 (1997) 1165–1185.
- [18] D. Vaslet, C. Larssonneur, J.-P. Auffret, Carte des sédiments superficiels de la Manche au 1:500 000<sup>e</sup> et notice explicative, BRGM, Orléans, 1978, 17 p.
- [19] M. Volmat, Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine, in : 22<sup>e</sup> Cah. rech. hydr. sur le régime des côtes, Imprimerie nationale, Paris, 1929, pp. 97–135.
- [20] R.A. Wheatcroft, J.C. Borgeld, Oceanic flood deposits on the northern California shelf: large-scale distribution and small-scale physical properties, Cont. Shelf Res. 20 (2000) 2163–2190.