



**HAL**  
open science

# La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle macrotidale: la Baie de Seine sud-orientale (France)

Sébastien Garnaud

► **To cite this version:**

Sébastien Garnaud. La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle macrotidale: la Baie de Seine sud-orientale (France). Minéralogie. Université de Caen, 2003. Français. NNT: . tel-00003489v1

**HAL Id: tel-00003489**

**<https://theses.hal.science/tel-00003489v1>**

Submitted on 6 Oct 2003 (v1), last revised 19 Jan 2004 (v2)

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# UNIVERSITÉ de CAEN/BASSE-NORMANDIE

U.F.R. : Sciences

ECOLE DOCTORALE : Structures, Informations, Matière et Matériaux

## THÈSE

présentée par

**Mr. Sébastien GARNAUD**

et soutenue

**le 28 mars 2003**

en vue de l'obtention du

**DOCTORAT de l'UNIVERSITÉ de CAEN**

**Spécialité : Terre Solide et Enveloppe Superficielle**

**(Arrêté du 25 avril 2002)**

### Titre :

## **LA SEDIMENTATION FINE SUR UNE PLATE-FORME INTERNE ACTUELLE MACROTIDALE: LA BAIE DE SEINE SUD-ORIENTALE (FRANCE)**



### MEMBRES du JURY :

Mr. Jean-Claude Brun-Cottan, Docteur d'Etat, Chargé de recherche CNRS, M2C Caen	<i>(Directeur de thèse)</i>
Mr. Patrick Lesueur, Maître de Conférences-HDR à l'Université de Caen	<i>(Co-encadrant de la thèse)</i>
Mr. Hervé Chamley, Professeur émérite à l'Université de Lille I	<i>(Rapporteur)</i>
Mr. Bernard Long, Professeur à l'INRS, Université de Québec, Canada	<i>(Rapporteur)</i>
Mr. Thierry Garlan, Ingénieur à l'EPSHOM, Brest	<i>(Examineur)</i>
Mr. Patrick Castaing, Professeur à l'Université de Bordeaux I	<i>(Examineur)</i>

A mes enfants, Quentin et Clément  
Et à leur maman, Claire

## **La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle macrotidale: la Baie de Seine sud-orientale (France)**

En Baie de Seine sud-orientale (shoreface à plate-forme interne), la sédimentation fine est étudiée à des échelles de temps variées, des dépôts holocènes argilo-tourbeux continentaux (9000 ans BP) aux événements de dépôt instantanés actuels liés à des "crues estuariennes". Lors de ces crues, succédant à de faibles débits prolongés, sont combinés les apports d'un stock de sédiments fins intra-estuariens et les MES originaires du bassin versant amont. Des placages de vase se mettent alors en place dans les petits fonds ouverts sableux. Ces fonds correspondent actuellement à un contexte d'ensemble érosif, où sont mises à l'affleurement les argiles holocènes; une reconstitution lithochronostratigraphique de ces dépôts fossiles est proposée. Il est montré l'importance: à l'échelle décennale et pluri-annuelle, d'un envasement progressif des sables subtidaux et, à l'échelle de la saison, d'épisodes paroxysmiques de dépôts de vase éphémères, remaniés par les houles et les courants de marée.

**Mots clefs:** sédimentologie / plate-forme interne / environnement macrotidal / dépôt de vase / évolution saisonnière / crue estuarienne / Holocène / Baie de Seine

---

### **Fine sedimentation on a macrotidal inner shelf: south-eastern Bay of the Seine (France)**

The fine sedimentation in the south-eastern Bay of the Seine (shoreface-to-inner shelf) is studied at different time-scales: from the Holocene clayey continental deposits (9000 years BP) to the present-day instantaneous event deposits linked to "estuarine floods". During these events, which follow prolonged weak river flows, the estuarine fine sediment stock and the SPM river-born material are mixed. Thus, veneers of fresh mud occur in this subtidal, opened sandy area. The sea-floor is commonly an erosional surface and relict clays crop out; a lithochronostratigraphical reconstruction of these holocene deposits is proposed. While at a multi-decade and -annual time-scale, silting of the sandy sediments has increased, on a seasonal time-scale, the sea-floor is affected by fine-grained sedimentation events; fresh muds are then reworked through processes which include waves and strong tidal currents.

**Keywords:** sedimentology / shoreface-to-inner shelf / macrotidal environment / mud deposit / seasonal evolution / estuarine flood / Holocene / Bay of the Seine

*Thèse préparée à l'UMR CNRS 6143, Morphodynamique continentale et côtière, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France*



*Financement: région Basse-Normandie et SHOM (Brest)*

# SOMMAIRE

## Introduction

---

<b>1. Problématique générale</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Sujet de l'étude et objectifs</b> .....	<b>2</b>
2.1 Etudes antérieures (XX <sup>ème</sup> siècle) .....	2
2.2 Sujet de cette étude: vasières temporaires et fossiles de la Baie de Seine orientale .....	3
2.2.1 Les vases temporaires sur sables homogènes .....	5
2.2.2 Les argiles compactes fossiles .....	5
2.3 Organisation du manuscrit .....	6

## Chapitre I

---

### Généralités sur les dépôts de sédiments fins sur les plateaux continentaux. Place de la Baie de Seine dans ce contexte

<b>1. Les sédiments fins terrigènes en domaine de plate-forme continentale</b> .....	<b>13</b>
1.1 Introduction .....	13
1.2 Origine des sédiments fins en contexte de plate-forme continentale .....	15
1.3 Types de vasières et taux d'accumulation sur les plates-formes continentales mondiales .....	18
1.4 Les mécanismes du contrôle de la sédimentation fine terrigène .....	22
1.5 Les dépôts de vase sur la plate-forme continentale française .....	24
1.5.1 La plate-forme atlantique .....	24
1.5.2 Mer de la Manche .....	25
<b>2. Caractéristiques générales de la Baie de Seine</b> .....	<b>26</b>
2.1 Cadre géologique et morphologique .....	27
2.1.1 Substratum anté-holocène .....	27
2.1.2 Histoire quaternaire de la Baie de Seine .....	28
2.1.2.1 Paléovallées de la Baie de Seine .....	28
2.1.2.2 La transgression flandrienne pendant l'Holocène .....	28
2.1.3 Couverture sédimentaire actuelle de la Baie de Seine .....	31
2.2 Hydrologie et hydrodynamisme de la Baie de Seine .....	34
2.2.1 Caractéristiques de la marée et des courants associés .....	34
2.2.2 Apports d'eau douce continentale .....	37
2.2.2.1 Débits fluviaux .....	37
2.2.2.2 Salinité .....	39
2.2.2.3 Bouchon vaseux et panache turbide de la Seine .....	40
2.2.3 Agitation: vent, houle et clapot .....	44

## Chapitre II

---

### Couverture sédimentaire meuble de la Baie de Seine orientale : caractéristiques des modifications lithologiques depuis 2 siècles

<b>1. Méthode de reconnaissance des sédiments superficiels de la Baie de Seine orientale.....</b>	<b>59</b>
1.1 Méthode du plomb suiffé.....	59
1.2 Techniques récentes d'échantillonnage.....	60
<b>2. Bilan de la répartition des faciès sédimentaires en Baie de Seine sud-orientale avant 1913 .....</b>	<b>61</b>
2.1 Type de données disponibles.....	61
2.2 Cartes de synthèse des faciès sédimentaires au début et à la fin du XIX <sup>ème</sup> siècle (cartes de 1834, 1880 et 1894).....	61
2.3 Carte de synthèse des faciès sédimentaires au début du XX <sup>ème</sup> siècle (1913).....	66
2.4 Discussion .....	66
<b>3. Distribution des fractions fines en Baie de Seine orientale depuis 1967 .....</b>	<b>70</b>
3.1 Situation décrite en 1967 .....	70
3.2 Situation décrite en 1977 .....	72
3.2.1 Couverture sédimentaire superficielle .....	72
3.2.2 Argiles holocènes dans les fonds marins subtidiaux au large de Cabourg .....	72
3.3 Situation actuelle: données VASTEDEBA 2000 .....	73
3.4 Bilan: évolution spatio-temporelle de la couverture sédimentaire de la Baie de Seine orientale depuis 30 ans.....	75
<b>4. Synthèse de l'évolution des fonds sédimentaires au cours des deux derniers siècles.....</b>	<b>76</b>

## Chapitre III

---

### Couverture sédimentaire actuelle de la Baie de Seine orientale : cartographie et caractéristiques des variations lithologiques saisonnières et pluri-annuelles

<b>1. Introduction .....</b>	<b>85</b>
<b>2. Stratégie d'échantillonnage et missions en mer .....</b>	<b>86</b>
2.1 Situation de la zone atelier et justification de ce choix .....	86
2.2 Stratégie d'échantillonnage .....	88
<b>3. Caractéristiques sédimentaires de la Baie de Seine sud-orientale en 2000 et 2001 .....</b>	<b>89</b>
3.1 Répartition des faciès sédimentaires .....	91
3.1.1 Taux de carbonates .....	91
3.1.2 Répartition des paramètres granulométriques.....	91
3.1.2.1 Moyenne et mode .....	91
3.1.2.2 Indices de dispersion et d'asymétrie .....	94
3.1.3 Figures sédimentaires: prospection au sonar à balayage latéral .....	96

3.1.3.1 Nature des faciès acoustiques.....	96
3.1.3.2 Figures d'érosion: les sillons coquilliers.....	98
3.1.3.3 Mégarides et voiles sableux .....	106
3.1.3.4 Fonds marins fossiles .....	106
3.1.3.5 Moulières au large de Deauville.....	111
3.1.3.6 Traces d'activités anthropiques.....	111
3.2 Secteurs envasés de la Baie de Seine orientale.....	115
3.2.1 Situation en février-mars 2000 .....	115
3.2.2 Situation en juin 2001 .....	115
3.2.3 Caractéristiques des zones envasées .....	117
3.2.3.1 Embouchure de l'Orne et dépôt de dragages .....	117
3.2.3.2 Vasières littorale et subtidale .....	119
3.2.3.3 Banc du Ratier.....	119
<b>4. Suivi saisonnier de l'évolution de l'envasement de la couverture sédimentaire en Baie de Seine sud-orientale.....</b>	<b>122</b>
4.1 Rappels sur les données antérieures: variations saisonnières des sédiments fins en 1981-1982.....	122
4.1.1 Résultats.....	122
4.1.2 Commentaires .....	124
4.2 Données nouvelles sur la couverture sédimentaire (Programme PNEC Baie de Seine et Seine-aval II): variations saisonnières et pluri-annuelles sur la zone atelier .....	125
4.2.1 Variations pluriannuelles constatées entre 1995 et 2001 .....	125
4.2.2 Variations saisonnières et pluri-annuelles: la zone atelier des radiales FLUXMANCHE.....	126
4.2.3 Evolution spatio-temporelle de la vasière temporaire subtidale sur la zone atelier .....	128
4.2.4 Informations apportées par l'imagerie sous-marine .....	133
4.2.4.1 Vidéo sous-marine.....	133
4.2.4.2 Système photographique REMOTS-SPI .....	134
4.2.5 Bilan des variations de l'envasement des sédiments superficiels au pas de temps saisonnier .....	134
4.3 Fluctuations de l'envasement en d'autres sites du système estuarien-Baie de Seine .....	138
4.3.1 Répartition des sédiments fins dans l'embouchure de la Seine.....	138
4.3.2 L'envasement du secteur atelier de la Baie de Seine nord-orientale (fonds au large du cap d'Antifer).....	138
4.4 Synthèse: envasements embouchure-Baie de Seine orientale .....	141
<b>5. Transport sédimentaire résiduel en Baie de Seine sud-orientale : méthode de Gao et Collins et confrontation avec les données in situ.....</b>	<b>142</b>
5.1 Domaines d'application et fraction sédimentaire concernée .....	142
5.2 Transports sédimentaires résiduels saisonniers en Baie de Seine sud-orientale selon la méthode de Gao et Collins .....	144
5.2.1 Directions et sens de transport calculés par la méthode en période hivernale (février 2000).....	144
5.2.2 Directions et sens de transport calculés par la méthode en période estivale (juin 2001).....	150
5.3 Confrontation des résultats de la méthode de Gao et Collins et des observations in situ.....	150
5.4 Synthèse: les transports sédimentaires à l'échelle saisonnière en Baie de Seine orientale d'après la méthode de Gao et Collins .....	155
<b>6. Origine des sédiments fins en Baie de Seine sud-orientale .....</b>	<b>159</b>
6.1 Sources de matériel sédimentaire fin dans la zone d'étude : bilan des connaissances.....	159

6.1.1 Flux particulières d'origine continentale.....	159
6.1.1.1 Apports actuels de particules fines en provenance du bassin amont de la Seine .....	159
6.1.1.2 Apports fluviaux du littoral du Calvados.....	161
6.1.1.3 Erosion des côtes du Calvados .....	161
6.1.2 Flux particulières d'origine marine .....	163
6.1.2.1 Apports d'origine planctonique .....	163
6.1.2.2 Apports externes à la Baie de Seine .....	163
6.1.2.3 Erosion des argiles reliques subtidales au large de Cabourg.....	164
6.1.2.4 Apports anthropiques: rejets de dragage le long des côtes du Calvados .....	164
6.2 Sources de sédiments fins en Baie de Seine sud-orientale: nouvelles données.....	165
6.2.1 Erosion des argiles fossiles subtidales au large de Cabourg.....	165
6.2.2 Nouveaux marqueurs minéralogiques et géochimiques des sédiments fins (silts et argiles).....	167
6.2.2.1 Cortège argileux des sédiments fins superficiels.....	168
6.2.2.2 Cortège argileux des argiles reliques submergées.....	173
6.2.2.3 Radionucléides artificiels <sup>60</sup> Co et <sup>137</sup> Cs: indicateurs des apports marins en Baie de Seine.....	174
6.2.3 Synthèse : les sources de matériel fin en Baie de Seine orientale.....	175
<b>7. Les apports de sédiments fins d'origine fluviale par les crues de la Seine dans le domaine sud-oriental.....</b>	<b>178</b>
7.1 Introduction .....	178
7.1.1 La sédimentation fine identifiée comme le produit des épisodes de crues fluviales sur les plates-formes continentales actuelles.....	178
7.1.2 Les crues océaniques (Oceanic flood) .....	179
7.2 Distribution de sédiments fins issus des apports de crue en Baie de Seine .....	181
7.2.1 Historique des crues de Seine .....	181
7.2.2 Evolution des crues de la Seine depuis 1941 .....	181
7.3 Campagnes de mesures hydrosédimentaires en point fixe au large de Villers-sur-Mer.....	183
7.3.1 Mesures en conditions d'étiage de la Seine.....	184
7.3.1.1 Période de moyennes vives-eaux .....	184
7.3.1.2 Période de grandes vives-eaux .....	186
7.3.2 Mesures en conditions de crue de la Seine .....	186
7.3.2.1 Période de mortes-eaux .....	186
7.3.2.2 Période de moyennes vives-eaux .....	189
7.3.2.3 Période de grandes vives-eaux .....	189
7.3.3 Synthèse: caractéristiques hydrosédimentaires et courantologiques des fonds subtidales au large de Villers-sur-Mer.....	192
7.4 Impacts de crues hivernales en Baie de Seine sud-orientale (1998-2001) .....	196
7.4.1 Analyse de la crue hivernale de 1998-1999.....	196
7.4.2 Commentaires sur la masse de sédiments fins observée sur la vaseuse subtidale en mars 1999... ..	197
<b>8. Conclusions .....</b>	<b>200</b>
8.1 Couverture sédimentaire et formes associées .....	200
8.2 Sources de sédiments fins.....	201
8.3 Transports sédimentaires .....	201
8.4 Mesures hydrosédimentaires .....	202
8.5 La Baie de Seine orientale, une zone d'envasement en continue évolution.....	203

## Chapitre IV

---

### Sédimentation fine holocène dans l'actuelle Baie de Seine sud-orientale

<b>1. Introduction .....</b>	<b>217</b>
<b>2. Les dépôts holocènes de la Baie de Seine: bilan des connaissances.....</b>	<b>218</b>
2.1 Dépôts quaternaires de la basse vallée de la Seine .....	218
2.2 La zone intertidale: les formations tourbeuses sur la côte du Calvados .....	219
2.3 Zone subtidale: les fonds marins reliques au large de Cabourg .....	221
<b>3. Nouveaux résultats sur l'histoire du remplissage holocène de la Baie de Seine sud-orientale .....</b>	<b>223</b>
3.1 Missions de carottages longs en 2000 et 2001 .....	223
3.2 Résultats: reconstitution lithostratigraphique du remplissage holocène de la Baie de Seine .....	226
3.2.1 Les dépôts sableux subtidaux .....	226
3.2.1.1 Résultats .....	226
3.2.1.2 Interprétation de la carotte 2686.....	228
3.2.2 Séquence des dépôts holocènes argileux .....	229
3.2.2.1 Faciès, structures et interprétations des dépôts sédimentaires.....	229
3.2.2.2 Données radiochronologiques .....	234
3.2.2.3 Teneurs en carbonates .....	235
3.2.2.4 Teneurs en carbone organique.....	237
3.2.2.5 Caractéristiques physiques: teneurs en eau et cohésion .....	241
3.2.2.6 Minéralogie des argiles .....	241
3.2.2.7 Analyse palynologique.....	243
3.3 Etude des dépôts reliques intertidaux de la plage de Franceville-Merville .....	248
3.3.1 Résultats.....	248
3.3.2 Conclusion .....	251
<b>4. Synthèse: séquence type du comblement holocène de la Baie de Seine sud-orientale.....</b>	<b>252</b>

## Chapitre V

---

### Synthèse et Conclusions générales

<b>1. Histoire de la sédimentation fine depuis l'Holocène jusqu'aux épisodes événementiels actuels en Baie de Seine sud-orientale</b>	
1.1 La sédimentation fine holocène (long terme, échelle de temps $10^4$ - $10^3$ ans) .....	259
1.2 La sédimentation fine depuis le XIX <sup>ème</sup> siècle (moyen terme, échelle de temps $10^2$ - $10^1$ ans) .....	263
1.2.1 Nature des fonds sédimentaires de la Baie de Seine orientale au cours du XIX <sup>ème</sup> siècle .....	263
1.2.2 Variations des fonds sédimentaires de la Baie de Seine orientale depuis 1913.....	263
1.3 La sédimentation fine au cours des dernières années (court terme, échelle de temps $< 10^0$ ans).....	265
1.3.1 Evolution pluri-annuelle (1995-2000) et inter-annuelle - saisonnière .....	265
1.3.2 "Crue estuarienne" .....	263

1.3.3 Evolution de la fraction fine en Baie de Seine orientale depuis 20 ans: envasement à moyen-terme des fonds subtidiaux ?.....	263
<b>2. Conclusions générales.</b> .....	<b>271</b>
<b>3. Perspectives</b> .....	<b>274</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>281-297</b>
<b>Listes des figures et tableaux</b> .....	<b>301-307</b>
<b>Annexes 1: Catalogue des données sédimentologiques acquises lors des missions VASTEDEBA</b> .....	<b>A-1</b>
Déroulement des missions et contexte hydrologique .....	A-1
VASTEDEBA 1 .....	A-6
VASTEDEBA 2 .....	A-17
VASTEDEBA 3 .....	A-25
VASTEDEBA 4 .....	A-33
<b>Annexe 2: Sonar à balayage latéral et calcul des paramètres granulométriques</b> .....	<b>A-41</b>
Sonar à balayage latéral.....	A-42
Calcul des paramètres granulométriques.....	A-44
<b>Annexe 3: Fondements et principe de la méthode de Gao et Collins</b> .....	<b>A-47</b>
Approche intuitive de Mc Laren (1981) et amélioration de la méthode par Mc Laren et Bowles (1985) ..	A-48
Approche de Gao et Collins (1991; 1992; Gao <i>et al.</i> , 1994).....	A-50
Distance critique.....	A-53
Grille d'échantillonnage.....	A-54
Echelles de temps .....	A-55
Conclusion sur la méthode .....	A-55
<b>Annexe 4: Oceanic flood, Eel river – STRATAFORM</b> .....	<b>A-59</b>
Introduction .....	A-60
Caractéristiques des dépôts de crue de janvier 1995 et janvier 1997 .....	A-61
Perspectives .....	A-62
<b>Annexe 5: Complément d'information au chapitre IV: dépôts holocènes de Saint-Côme de Fresné – Asnelles et de l'ancien ruisseau de Luc-sur-mer</b> .....	<b>A-65</b>
Les formations tourbeuses sur la côte du Calvados.....	A-66
Saint-Côme de Fresné – Asnelles.....	A-66
L'ancien ruisseau de Luc-sur-mer.....	A-67
<b>Annexe 6: Caractérisation des variations lithologiques saisonnières des sédiments de la Baie de Seine sud-orientale; impact des crues de la Seine (France)</b> .....	<b>A-71</b>

# Introduction

---

<b>1. Problématique générale</b> .....	<b>2</b>
<b>2. Sujet de l'étude et objectifs</b> .....	<b>3</b>
2.1 Etudes antérieures .....	3
2.2 Sujet de cette étude: vasières temporaires et fossiles de la Baie de Seine orientale .....	4
2.2.1 Les vases temporaires sur sables homogènes .....	6
2.2.2 Les argiles compactes fossiles .....	6
2.3 Organisation du manuscrit .....	7

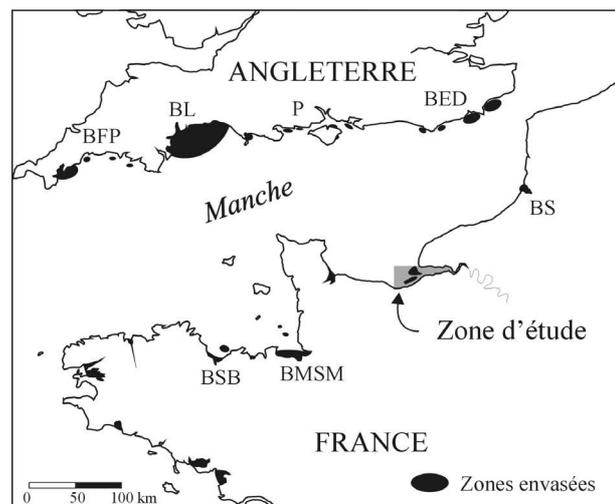
# Introduction

## 1. Problématique générale

En domaine côtier, les sites privilégiés d'accumulation de sédiments fins, qui comprennent les sables très fins et les pélites (silts et argiles,  $< 50 \mu\text{m}$ ), sont variés mais sont le plus souvent localisés dans la partie médiane des plateaux continentaux ouverts (Eisma, 1992). En Baie de Seine, comme plus généralement en Manche (*fig. In-1*), les sédiments fins se cantonnent généralement aux secteurs de baies abritées et d'estuaires (Larsonneur, 1971; Vaslet *et al.*, 1978; Avoine, 1981; Avoine *et al.*, 1984; Avoine & Larsonneur, 1987). Toutefois, malgré l'énergie hydrodynamique intense associée au régime macrotidal et à l'agitation de la mer dans un domaine où les profondeurs d'eau sont faibles, des fractions fines sont couramment échantillonnées en Baie de Seine. L'extension de ces sédiments fins s'est même accrue au cours des deux ou trois dernières décennies comme le montrent les travaux les plus récents (Avoine, 1994; Lesueur *et al.*, 1997; Lesourd *et al.*, 2003). Ces fractions fines se trouvent soit:

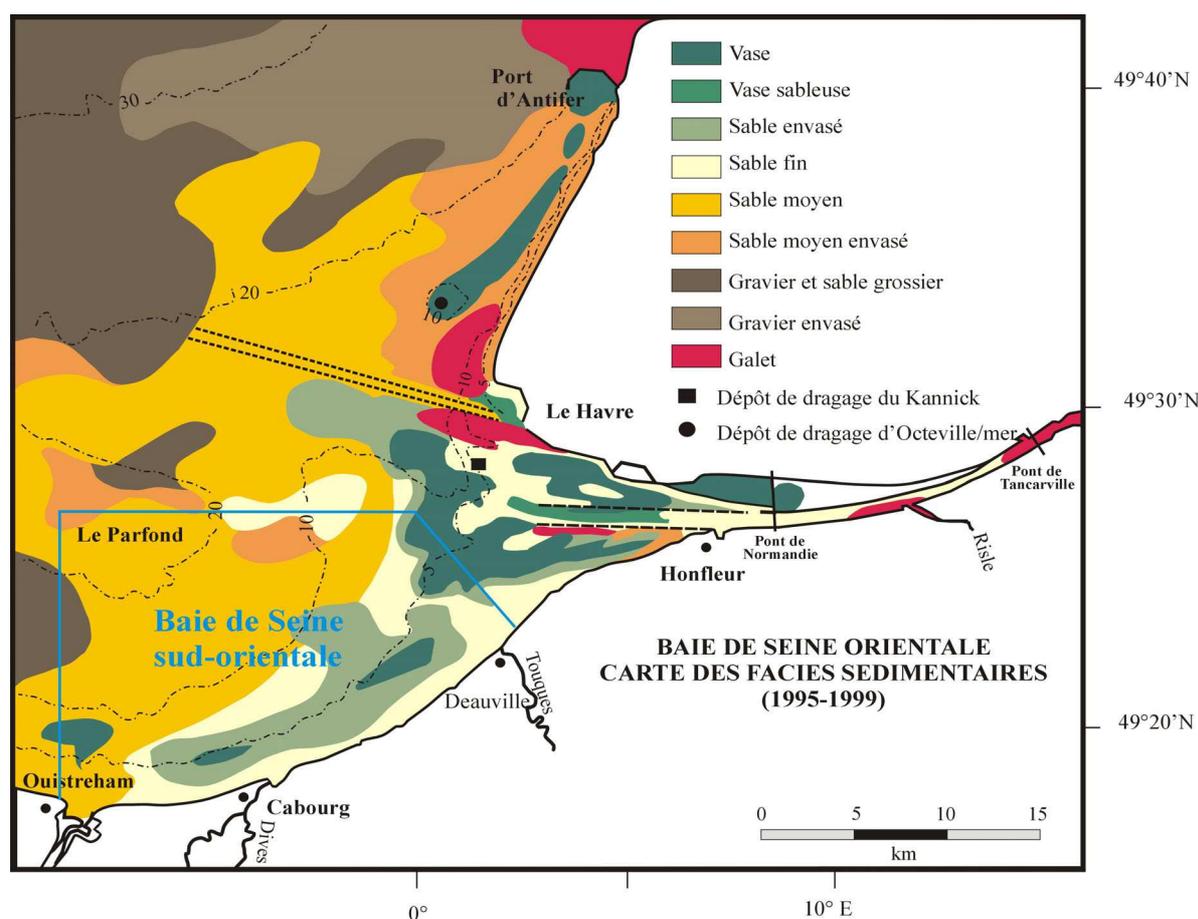
- piégées dans des sédiments grossiers hétérométriques, phénomène souvent accentué si la densité faunistique benthique est notable (Thiébaud *et al.*, 1997),
- mélangées aux sables fins à moyens de la partie orientale de la Baie de Seine, comme le souligne l'envasement observé au large des côtes du Calvados (Avoine, 1981),
- en situation de recouvrement superficiel temporaire de sables fins/moyens par ailleurs homogènes (Avoine, 1981; Larsonneur & Avoine, 1981; Avoine, 1994).

Ces situations correspondent aux modalités de dépôt des particules fines d'une grande partie des plateaux continentaux à faible alimentation terrigène. Les sédiments fins transitant en Manche proviennent, pour leur majeure partie, de la zone marine ouverte (Boust, 1999) et, pour une part plus faible, des apports continentaux (Dupont *et al.*, 1994).



**Figure In-1.** Localisation des dépôts vaseux en Manche. BSB: Baie de St-Brieuc, BMSM: Baie du Mt Saint-Michel, BS: Baie de Somme, BFP: Baie de Falmouth, BL: Baie de Lyme, P: Baie de Poole, BSEA: Baies d'Eastbourne et Dungeness (d'après Vaslet *et al.*, 1978; Larsonneur *et al.*, 1982)

En outre, l'actualisation de la cartographie de la Baie de Seine orientale (1999) montre une tendance à l'envasement des fonds sablo-graveleux proches du Pays de Caux (Avoine *et al.*, 1984), en relation avec l'envasement accru de l'embouchure de la Seine (Lesourd *et al.*, 1997; Lesueur *et al.*, 1997) (*fig. In-2*). Le suivi de traceurs radioactifs confirme globalement la grande mobilité de ces particules fines à différentes échelles spatiales et temporelles (Avoine *et al.*, 1984; Spineanu, 1998; Boust, 1999). Toutefois, l'importance des surfaces envasées et l'identification des sources de ce matériel nécessitent une meilleure connaissance de la nature des fonds, des processus de dépôt et des mécanismes d'érosion et de transport des sédiments superficiels.



**Figure In-2.** Carte des faciès sédimentaires de la Baie de Seine orientale (données sédimentaires 1995-1998) (Lesourd, 2000). Situation de la zone d'étude, la Baie de Seine sud-orientale; limites géographiques: au sud de la latitude 49°26'N et entre Ouistreham (00°15'W) et l'est de Deauville (00°03'E) en longitude.

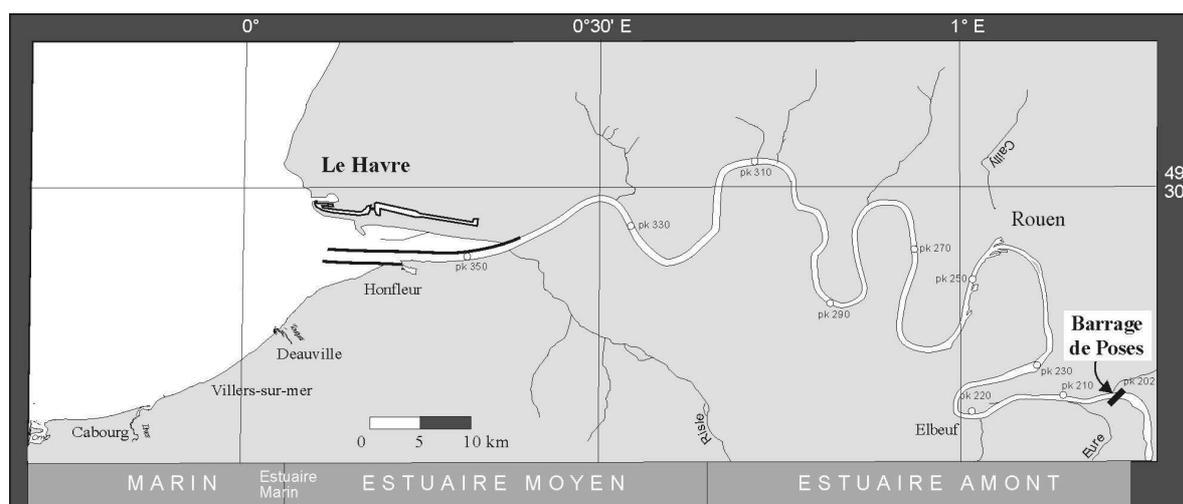
## 2. Sujet de l'étude et objectifs

### 2.1 Etudes antérieures (XX<sup>ème</sup> siècle)

La première étude complète de la Baie de Seine orientale date de 1910 (Thoulet, 1908-1909) mais ce n'est qu'à partir de 1964 que les travaux de reconnaissance des fonds

ont repris à la fois dans le domaine marin de la Baie de Seine (e.g. Larsonneur & Hommeril, 1967; Larsonneur, 1971; Avoine *et al.*, 1984) et dans le domaine estuarien uniquement à l'aval du pont de Tancarville (Germaneau, 1968, 1974; Avoine, 1981), par exemple au cours du "SAUM-Estuaire de la Seine" (Schéma d'Aptitude pour l'Utilisation de la Mer: SAUM, 1980). En amont, si de nombreux travaux portaient sur la reconnaissance du remblaiement alluvial quaternaire de la Seine (e.g. Lefebvre *et al.*, 1974; Lefebvre, 1977), les données sur la couverture sédimentaire actuelle à plus de 70 km de l'embouchure étaient jusqu'alors ponctuelles (Germaneau, 1971; Porcher, 1977) avec des cartographies souvent exprimées par simples coupures granulométriques (Germaneau, 1968, 1969).

Du fait des relations entre les particules fines et les contaminants associés (métaux, polluants organiques et chimiques), les études hydrosédimentaires ont été relancées dans le cadre du programme scientifique Seine-Aval (phase 1, 1995-99) en intégrant cette fois-ci l'ensemble du système estuarien, de Poses (limite amont de la marée dynamique, *fig. In-3*) jusqu'à la proche Baie de Seine. Ces travaux ont montré que les sédiments fins vaseux dans l'embouchure de la Seine sont essentiellement d'origine continentale (Dupont *et al.*, 1994; Dupont *et al.*, 2001) et que ces matériaux fins sont présents sous la forme de (1) matières en suspension (MES), concentrées au niveau du bouchon vaseux (Brenon & Le Hir, 1999; Le Hir *et al.*, 2001; Cugier & Le Hir, 2002), (2) de vase fluide ou crème de vase correspondant à un processus de concentration à la base de la colonne d'eau dans les chenaux (Dupont *et al.*, 1994; Guézennec *et al.*, 1999; Dupont *et al.*, 2001) et (3) de vase déposée sur les vasières intertidales (Lesueur & Lesourd, 1999; Lesourd, 2000; Lesueur *et al.*, 2002; Lesourd *et al.*, 2003). La réduction des zones intertidales au sein de l'estuaire, accélérée par les aménagements, a entraîné un déplacement de la zone mobile de sédimentation fine vers l'aval de l'estuaire.



**Figure In-3.** Estuaire et embouchure de la Seine. Estuaire moyen: zone de mélange entre eaux douce/salée, présence du bouchon vaseux. Estuaire moyen: limite de l'intrusion saline, zone soumise à la marée.

Tout en restant peu nombreuses, des reconnaissances plus récentes du domaine de l'embouchure et des abords marins de la Baie de Seine orientale (Avoine, 1981; Crevel,

1983; Avoine, 1984) laissaient suspecter une évolution des conditions de la sédimentation fine, pouvant être mises en relation avec les modifications morphologiques de l'estuaire. Les travaux réalisés par Avoine au cours des années 1970-1980 (1981; 1994) avaient alors fourni les toutes premières indications sur les variations saisonnières de la couverture sédimentaire des fonds subtidiaux adjacents à l'estuaire de la Seine. Ainsi, les dépôts pélagiques avaient une extension maximale durant l'hiver 1981 dans l'embouchure tandis que l'envasement des fonds au large du Calvados se produisait plutôt au cours de l'étiage en 1982, en période de calme hydrodynamique relatif.

## 2.2 Sujet de cette étude: vasières temporaires et fossiles de la Baie de Seine orientale

Si les modalités des fluctuations des envasements sont désormais bien décrites en estuaire de Seine (Guézennec *et al.*, 1999; Lesourd, 2000; Lesourd *et al.*, 2003), les études en Baie de Seine orientale avaient été différées. Cependant, la connaissance des processus concernant la sédimentation fine est devenue nécessaire dans un milieu côtier sensible, soumis à des activités anthropiques aux intérêts souvent divergents (aménagement portuaires, exploitation de la mer pour la pêche et tourisme balnéaire). La sédimentation fine peut avoir sur l'environnement marin des conséquences à différentes échelles de temps, à court (annuel) et moyen terme (pluri-annuel):

- asphyxie de la faune benthique et déplacement des populations benthiques, avec une possible migration des zones de pêche,
- difficulté pour la reconnaissance des obstacles (naturels et artificiels, e.g. mines) lorsqu'ils sont recouverts de manière temporaire par des sédiments fins,
- possibilité d'un impact sur les basses plages, des dépôts vaseux temporaires ayant été reconnus à proximité immédiate du domaine intertidal du Calvados,
- problèmes de qualité des eaux, avec augmentation de la turbidité et accroissement des polluants associés aux vases, risquant à moyen terme de contaminer les fonds et le peuplement benthique de la Baie de Seine.

Avec cette perspective appliquée, l'étude des petits fonds ouverts voisins des côtes du Calvados a été entreprise dans le but de caractériser l'origine et les modalités de l'évolution de la sédimentation fine à des échelles de temps allant de la saison à plusieurs années. Ainsi, plusieurs campagnes en mer (BENTHOSEINE 1998-1999 et VASTEDEBA 2000-2001) ont permis de procéder à une reconnaissance des sédiments superficiels et à 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 ces reconnaissances des petits fonds subtidiaux étaient:

- de compléter la compréhension du fonctionnement hydrosédimentaire du système estuaire-Baie de Seine (Avoine *et al.*, 1986; Lesueur *et al.*, 1997; Lesourd, 2000),
- de comparer les nouvelles données avec celles acquises précédemment sur les

sédiments superficiels par l'Université de Caen (prélèvements de 1967, 1977, et 1995) ou celles obtenues antérieurement par la méthode du plomb suiffé (XIX<sup>ème</sup> siècle - début du XX<sup>ème</sup> siècle),

- de caractériser et de comprendre la mobilité de la fraction pélitique à l'échelle saisonnière (i.e. à court terme) et pluri-annuelle (i.e. à moyen terme) par l'utilisation de méthodes d'investigation directes (échantillonnage de sédiments superficiels, sonar à balayage latéral) ou indirectes (application de la méthode de Gao et Collins).

Ce travail de thèse s'est inséré dans le cadre des actions de recherche du Programme National sur les Environnements Côtiers (PNEC) "Chantier Baie de Seine" et SEINE-AVAL II.

### 2.2.1 Les vases temporaires sur sables homogènes

Nos investigations récentes dans la Baie de Seine sud-orientale montrent qu'aux faibles profondeurs (< 10 m), le domaine subtidal est soumis à des périodes d'envasement temporaire par recouvrement des sables fins à moyens. Ce sont de minces placages diffus de vases souvent fluides, aux contours mal connus et fluctuants, présents sur des aires toutefois cartographiables. L'explication de leur présence épisodique est recherchée, dans un environnement où la diversité des sources de matériel fin et la complexité des processus dynamiques mis en jeu (combinaisons météorologiques, tidales et d'apports fluviatiles) sont autant de paramètres à considérer. Les questions posées au début de ce travail étaient les suivantes:

- Quelle est l'**origine de ces dépôts instables** ? Quelles en sont les **sources** ?
- **Existe-t-il réellement un cycle saisonnier** de ces dépôts comme cela a été suggéré dans les années 1980 ?
- Pourquoi ces **dépôts fins existent-ils en certains sites et pas en d'autres** alors qu'ils présentent des conditions morphologiques et hydrodynamiques en apparence analogues ?
- L'envasement de la Baie de Seine orientale correspond-il réellement à une **tendance avérée** au cours des vingt dernières années ?

### 2.2.2 Les argiles compactes fossiles

Des argiles compactes, présentées comme reliques, ont été reconnues de façon discontinue en Baie de Seine orientale (Avoine, 1981). Les travaux antérieurs (Volmat, 1929) ont montré que ces fonds de petites profondeurs (0-10 m) étaient en contexte érosif, en raison d'un approfondissement de 1 à 3 m au cours du XIX<sup>e</sup> siècle. Afin d'entreprendre la reconnaissance de ces dépôts, deux missions de prospection au sonar à balayage latéral ont

été réalisées avec pour objectif de délimiter leur extension. En effet, ces sédiments pélicitiques anciens à l’affleurement peuvent peut-être apporter des éléments de réponse dans la compréhension de la répartition des sédiments vaseux actuels et de leur dynamique dans ce secteur. Les questions posées étaient alors:

- Quelle est **l'aire de répartition actuelle de ces dépôts argileux** ?
- Quels facteurs sont nécessaires à **l'érosion de ces argiles reliques** ?
- Quelle peut-être la **contribution de ces argiles compactes à l'envasement** observé en Baie de Seine orientale ? Existe-t-il une relation entre les **envasements temporaires** observés et la présence à **l'affleurement de ces argiles compactes** ?

La reconnaissance sédimentologique et lithostratigraphique de ces sédiments consolidés a été entreprise lors de missions de carottages longs, avec pour questions supplémentaires:

- Quelle est **la nature et l'âge de ces dépôts anciens** ?
- Dans quels **milieus de sédimentation** se sont mis en place ces dépôts ?
- Peut-on intégrer ces argiles reliques dans une **reconstitution** des modalités de l'évolution des sédiments fins de l'actuelle Baie de Seine sud-orientale au cours d'une **séquence de dépôt à l'échelle de l'Holocène** ?

### 2.3 Organisation du manuscrit

Les chapitres de cette thèse s'ordonnent selon les différentes échelles de temps qui font évoluer les fonds marins à la fois actuels et fossiles. **La présentation de ces chapitres ne s'appuie pas sur une chronologie logique des enregistrements mais retrace le déroulement de cette étude.** Elle ne pouvait démarrer sans une recherche bibliographique préalable et la consultation des archives du SHOM qui possèdent des documents cartographiques précieux des fonds marins. Ces documents permettent de comprendre l'évolution de la couverture sédimentaire de la Baie de Seine sud-orientale avant même les aménagements de l'estuaire de la Seine. Ce premier travail a ensuite permis d'aborder les évolutions saisonnières et pluri-annuelles actuelles, qui constituent le cœur de la problématique de ce travail avec le déploiement en mer de nombreux moyens d'investigation (*cf. annexe 1*). Enfin, l'étude des sédiments reliques permet de répondre aux questions que nous nous sommes posées suite à nos premiers travaux en mer sur les sédiments reliques affleurants dans les fonds subtidaux.

Le premier chapitre comprend un bilan sur la problématique des **dépôts fins sur les plateaux continentaux** et sur la place que peut occuper la Baie de Seine dans ce contexte général.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de **documents d'archives du SHOM** afin de retracer l'évolution des faciès sédimentaires superficiels dans la Baie de Seine sud-orientale depuis près de deux siècles; la comparaison des **cartographies plus récentes** (1967-1977) avec nos données actuelles est ensuite entreprise.

Le troisième chapitre présente les résultats acquis lors des campagnes en mer de 1999 et 2001 qui ont permis de cartographier la couverture sédimentaire et de rechercher les processus sédimentaires à l'origine des **variations lithologiques saisonnières et pluri-annuelles**, en particulier les mécanismes d'envasement. Une description des transits sédimentaires et de la contribution des sources de matériel particulaire sur la zone est proposée.

Le quatrième chapitre concerne l'étude de l'enregistrement de **la sédimentation fine holocène** et la reconstitution de l'histoire du remplissage des fonds actuels de cette partie de la Baie de Seine. Il s'agit de la première étude lithostratigraphique de sédiments holocènes subtidaux en Normandie, jusqu'alors décrits seulement en domaine continental et intertidal.

Enfin, le cinquième chapitre est une **synthèse** des résultats de cette étude présentée en suivant les trois échelles de temps de la sédimentation fine étudiée en Baie de Seine sud-orientale: long terme ( $10^3$ - $10^4$  ans, Holocène), moyen terme ( $10^1$ - $10^2$  ans, séculaire à pluri-décennal) et court terme ( $< 10^0$  ans, inter-annuel et saisonnier).

## Bibliographie de l'introduction

- Avoine, J.** (1981). L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 236 p.
- Avoine, J.** (1984). Evolution hydrodynamique et sédimentaire de l'estuaire de la Seine. *L'estuaire de la Seine, enjeux écologiques et économiques. Actes de colloques*, Le Havre, 53-67.
- Avoine, J.** (1994). Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. *Rapport d'étude, IFREMER - Port autonome du Havre*, Brest, 153 p.
- Avoine, J., Caillot, A., Hoslin, R., Larsonneur, C., Massias, J. & Quesney, M.** (1986). Contribution des traceurs radioactifs à l'étude des mouvements sédimentaires en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 211-218.
- Avoine, J., Crevel, L., Dubrulle, L., Boust, D. & Guegeniat, P.** (1984). Sédiments et dynamique sédimentaire en Baie de Seine. *XVIII<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique*. Société Hydrotechnique de France, Marseille, I.3.1-I.3.8.
- Avoine, J. & Larsonneur, C.** (1987). Dynamics and behaviour of suspended sediment in macrotidal estuaries along the south coast of the English Channel. *Continental Shelf Research* 7 (11/12), 1301-1305.
- Boust, D.** (1999). Distribution and inventories of some artificial and naturally occurring radionuclides in medium to coarse-grained sediments of the channel. *Continental Shelf Research* (19), 1959-1975.
- Brenon, I. & Le Hir, P.** (1999). Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): identification of formation processes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49, 525-544.
- Crevel, L.** (1983). Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la Baie de Seine. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 186 p.
- Cugier, P. & Le Hir, P.** (2002). Development of 3D hydrodynamic model for coastal ecosystem modelling. Application to the plume of the Seine River (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 55 (5), 673-695.
- Dupont, J.-P., Guézennec, L., Lafite, R., Le Hir, P. & Lesueur, P.** (2001). Matériaux fins. Le cheminement des particules en suspension. Programme scientifique Seine-Aval, 4. *IFREMER*, 40 p.
- Dupont, J.-P., Lafite, R., Huault, M.-F., Hommeril, P. & Meyer, R.** (1994). Continental/marine ratio changes in suspended and settled matter across a macrotidal estuary (the Seine estuary, northwestern France). *Marine Geology* 120, 27-40.
- Eisma, D.** (1992). Suspended matter in the aquatic environment. *Springer-Verlag*, Berlin, 315 p.
- Germaneau, J.** (1968). Etude de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine. Origine, déplacement et dépôt des sables. *Travaux de Recherche et d'Etude Océanographique* VIII (1-2), 1-63.
- Germaneau, J.** (1969). Etude de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine. Origine, déplacement et dépôt des suspensions. *Travaux de Recherche et d'Etude Océanographique* IX (1-4), 1-100.
- Germaneau, J.** (1971). Sédiments actuels et sédiments fossiles dans la Seine maritime et dans la Seine fluviale. *Travaux de Recherche et d'Etude Océanographique* XI (1-4), 55-110.
- Germaneau, J.** (1974). Etude de la sédimentation dans la Seine et dans son estuaire. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Bordeaux*, 84 p.
- Guézennec, L., Lafite, R., Dupont, J.-P., Meyer, R. & Boust, D.** (1999). Hydrodynamics of suspended particulate matter in the tidal freshwater zone of a macrotidal estuary (the Seine estuary, France). *Estuaries* 22 (3A), 717-727.
- Larsonneur, C.** (1971). Manche centrale et Baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles, *Thèse d'Etat de l'Université de Caen*, 394 p.
- Larsonneur, C. & Avoine, J.** (1981). Détermination des flux de matières en suspension en Baie de Seine. Contrat IFREMER 81/6559. *Contrat IFREMER 81/6559, Laboratoire de géologie marine, Université de Caen*, 45 p.
- Larsonneur, C., Bouysse, P. & Auffret, J.-P.** (1982). The superficial sediments of the English Channel and its Western Approaches. *Sedimentology* 29, 851-864.
- Larsonneur, C. & Hommeril, P.** (1967). Sédiments et sédimentation dans la partie orientale de la Baie de Seine. *Extrait de la revue des sociétés savantes de Hautes-Normandie* 47, 45-75.
- Le Hir, P., Ficht, A., Silva Jacinto, R., Lesueur, P., Dupont, J.-P., Lafite, R., Brenon, I., Thouvenin, B.**

- & Cugier, P.** (2001). Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine estuary (France). *Estuaries* 24 (6B), 950-963.
- Lefebvre, D.** (1977). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 67-72.
- Lefebvre, D., Huault, M.-F., Guyader, J., Giresse, P., Hommeril, P. & Larsonneur, C.** (1974). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine: synthèse sédimentologique, stratigraphique et paléogéographique. *Bulletin d'Information Géologique du Bassin de Paris* 39, 27-36.
- Lesourd, S.** (2000). Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal: zoom temporel du siècle à l'heure; application à l'estuaire de la Seine. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 280 p.
- Lesourd, S., Lesueur, P. & Brun-Cottan, J.-C.** (1997). Intérêt des études rhéologiques de sédiments vaseux littoraux. Le cas de l'embouchure de la Seine. *6ème Congrès Français de Sédimentologie, Poster et Résumés, Paris*. ASF, 169-170.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Garnaud, S. & Poupinet, N.** (2003). Seasonal variations in the characteristics of superficial sediments in a macrotidal estuary (the Seine inlet, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52, 1-14.
- Lesueur, P., Garnaud, S., Lesourd, S., Brun-Cottan, J.-C., Poupinet, N. & Tessier, B.** (2002). Fonctionnement sédimentaire de vasières intertidales et subtidales de la Seine. *Rapport annuel programme Seine-Aval II, Thématique II: Zones connexes, Atelier II.3: Fonctionnement des vasières*, Université de Caen, 32 p.
- Lesueur, P. & Lesourd, S.** (1999). Sables, chenaux, vasières. Dynamique des sédiments et évolution morphologique. Programme scientifique Seine-Aval, 3. *IFREMER*, 39 p.
- Lesueur, P., Lesourd, S., Auffret, J.P., Avoine, J., Brun-Cottan, J.-C. & Levoy, F.** (1997). Etat des connaissances sur la distribution et l'évolution des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine. *Rapport programme Seine-Aval 1996/FIN-1, Thème Hydrodynamique et transport sédimentaire*, 82-115.
- Porcher, M.** (1977). Lithostratigraphie des alluvions fluviales holocènes de la basse vallée de la Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 181-201.
- SAUM** (1980). Estuaire de la Seine: études hydrosédimentaire (J. Avoine, 95 p.), études des suspensions (J.-P. Dupont & F. David, 56 p.), programme géochimie (D. Boust, 52 p), analyses par activation neutronique (P. Guégueniat, 13 p.). *dossier n°4, eau et sédiments*, 216 p.
- Spineanu, A.** (1998). Mobilité des sédiments fins en Baie de Seine (Manche). *Mémoire de DEA, Université de Lille/Orsay*, 56 p.
- Thiébaud, E., Cabioch, L., Dauvin, J.-C., Retière, C. & Gentil, F.** (1997). Spatio-temporal persistence of the *Abra Alba-Pectonaria Koreni* muddy-fine sand community of the eastern bay of seine. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 77, 1165-1185.
- Thoulet** (1908-1909). Etude des fonds marins de la Baie de Seine. *Annales hydrographiques*, 1-28.
- Vaslet, D., Larsonneur, C. & Auffret, J.-P.** (1978). Carte des sédiments superficiels de la Manche au 1:500 000<sup>e</sup> et notice explicative. B.R.G.M, Orléans, 17 p.
- Volmat, M.** (1929). Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. *22<sup>ème</sup> cahier de la recherche hydrographique sur le régime des côtes*, 97-135.

# Chapitre I

---

## Généralités sur les dépôts de sédiments fins sur les plateaux continentaux. Place de la Baie de Seine dans ce contexte

<b>1. Les sédiments fins terrigènes en domaine de plate-forme continentale.....</b>	<b>13</b>
1.1 Introduction.....	13
1.2 Origine des sédiments fins en contexte de plate-forme continentale.....	15
1.3 Types de vasières et taux d'accumulation sur les plates-formes continentales mondiales.....	18
1.4 Les mécanismes du contrôle de la sédimentation fine terrigène.....	22
1.5 Les dépôts de vase sur la plate-forme continentale française nord-européenne.....	24
1.5.1 La plate-forme atlantique.....	24
1.5.2 La Manche.....	25
<b>2. Caractéristiques générales de la Baie de Seine.....</b>	<b>26</b>
2.1 Cadre géologique et morphologique.....	27
2.1.1 Substratum anté-holocène.....	27
2.1.2 Histoire quaternaire de la Baie de Seine.....	28
2.1.2.1 Paléovallées de la Baie de Seine.....	28
2.1.2.2 La transgression flandrienne pendant l'Holocène.....	28
2.1.3 Couverture sédimentaire actuelle de la Baie de Seine.....	31
2.2 Hydrologie et hydrodynamisme de la Baie de Seine.....	34
2.2.1 Caractéristiques de la marée et des courants associés.....	34
2.2.2 Apports d'eau douce continentale.....	37
2.2.2.1 Débits fluviaux.....	37
2.2.2.2 Salinité.....	39
2.2.2.3 Bouchon vaseux et panache turbide de la Seine.....	40
2.2.3 Agitation: vent, houle et clapot.....	44

## Chapitre I

---

### Généralités sur les dépôts de sédiments fins sur les plateaux continentaux. Place de la Baie de Seine dans ce contexte

Les plates-formes continentales sont des sites peu propices au maintien des dépôts fins puisqu'en général (i) la topographie ne comporte pas ou peu de dépressions abritées de l'action des houles océaniques sensibles en domaine interne, (ii) les ondes internes sont assez fréquentes sur les plates-formes externes et (iii) les courants de marée sur la plate-forme interne y sont plus développés qu'au large. Toutefois, les dépôts vaseux existent en domaine de plate-forme actuelle et sont le plus souvent associés aux grands systèmes fluviaux mondiaux. Les études des corps sédimentaires vaseux sur les plateaux continentaux sont récentes (McCave, 1972). En fait, l'étude des sédiments fins a surtout été relancée suite à l'apparition de nouveaux outils d'investigation géophysique (sondeur, sismique très haute définition, sonar à balayage latéral, e.g. Lesueur *et al.*, 1996; Lesueur *et al.*, 2001; Chavez *et al.*, 2002), d'outils de radiographie aux rayons X (Migeon *et al.*, 1999; Goff *et al.*, 2002) et aux progrès réalisés dans les analyses d'éléments géochimiques en traces (e.g. Yang *et al.*, 2002) et de radioéléments (e.g. DeMaster *et al.*, 1985; Harden *et al.*, 1992; Su & Huh, 1999). Ainsi, depuis le début des années 1980, un regain d'intérêt s'est dégagé en particulier au cours des programmes américains STRESS (Sediment TRansport Events on Shelves and Slopes experiment, Trowbridge & Nowell, 1994), AMASSEDS (A Multidisciplinary Amazon Shelf SEDiment Study, Nittrouer *et al.*, 1991a), et STRATAFORM (Nittrouer & Kravitz, 1996; Nittrouer & Kravitz, 1998; Nittrouer, 1999) développé par l'Office de la recherche Naval américain (Office of Naval Research). Toutefois, les études ont longtemps porté sur des systèmes associés aux grands fleuves mondiaux là où les accumulations de dépôts vaseux se répartissent sur de larges surfaces et présentent des épaisseurs conséquentes. En France, les études portant sur les dépôts fins sur les plates-formes Manche, Atlantique et Méditerranéenne ont été nombreuses entre 1970 et 1990, mais restent depuis, limitées à quelques rares secteurs (plateaux continentaux du Golfe de Gascogne, Baie de Seine, Golfe du Lion). Les travaux réalisés sur la sédimentation fine en Baie de Seine ont été relancés à partir de 1998 grâce aux programmes PNEC "Baie de Seine", et "Seine-Aval".

#### 1. Les sédiments fins terrigènes en domaine de plate-forme continentale

##### 1.1 Introduction

Représentant plus 7 % de la superficie total des océans, les plates-formes continentales sont par définition les fonds marins situés entre la ligne de rivage et la rupture de pente du talus

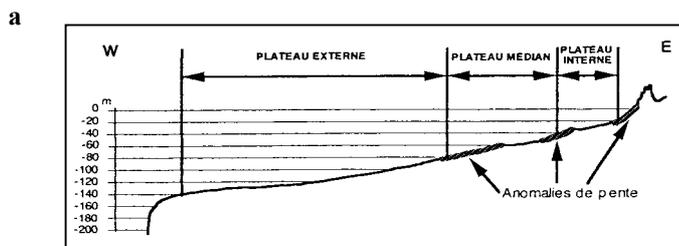
continental. La largeur moyenne de ces plates-formes est de 78 km mais peut atteindre 1500 km; si la limite externe se situe en moyenne à 135 m de profondeur, elle peut varier de 20 à 550 m (Emery, 1969). La topographie des plateaux continentaux est généralement plane avec une pente faible de l'ordre de  $0,1^\circ$ . Les plates-formes sont souvent considérées comme un lieu de transit des matériaux sédimentaires issus du continent allant s'accumuler sur le talus continental ou au-delà. Elles sont cependant modelées par différents corps d'accumulations sédimentaires sableux ou graveleux (e.g. dunes sous-marines hydrauliques) mais également par des incisions en partie liées aux érosions créées durant les variations glacio-eustatiques du Quaternaire.

Actuellement, les sédiments qui recouvrent les plates-formes continentales au-delà de 40 à 50 m de profondeur sont souvent des sables grossiers issus de sédiments anciens. Ce sont alors des sédiments reliques en déséquilibre avec les conditions environnementales actuelles (Shepard, 1932; Emery, 1968; Sternberg, 1981; Emery & Uchupi, 1984). Certaines classifications des sédiments (Swift *et al.*, 1971; Curray, 1973; Barusseau & Long, 1976) mettent l'accent sur le lien entre le dépôt (indépendamment de son origine et l'âge de sa mise en place) et les conditions dynamiques présentes. Cette classification a permis de distinguer (1) les sédiments en équilibre avec les conditions hydrodynamiques, dont l'origine est actuelle, (2) les dépôts reliques, mis en place dans un milieu différent du présent, et (3) les sédiments palimpsestes résultant du remaniement de matériaux reliques sous les conditions actuelles.

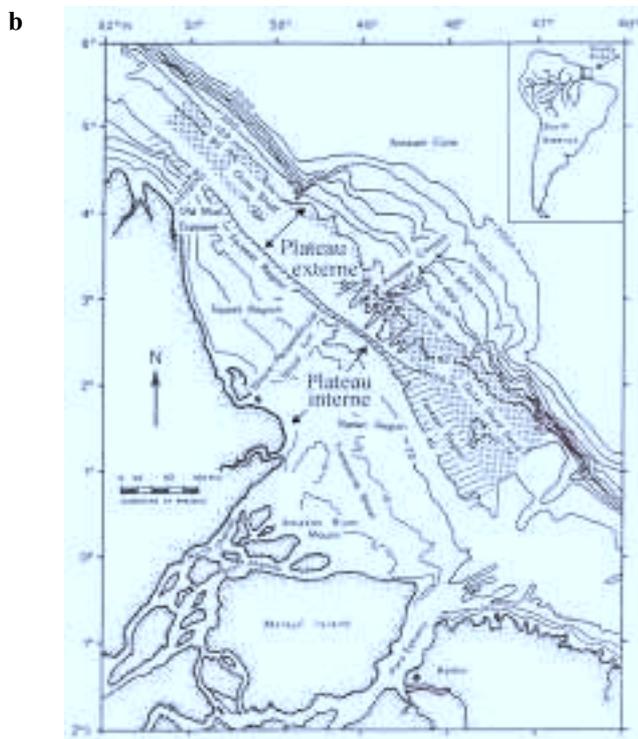
Les plates-formes continentales mondiales actuelles sont subdivisées selon un profil perpendiculaire à la côte. Ce découpage arbitraire en zones géomorphologiques peut correspondre à des anomalies de pente formant des abrupts dirigés vers le large (*fig. I-1*). Schématiquement, au-delà du domaine littoral concerné par l'action des vagues et des houles (~10 m), trois zones géomorphologiques sont définies:

- la plate-forme interne (*inner shelf*) sollicitée par les courants de marée, les vagues et les tempêtes, par exemple jusqu'à 40 m de profondeur sur le plateau continental aquitain (*fig. I-1a*, Cirac *et al.*, 2000),
- la plate-forme médiane (*mid shelf*) située entre 30 et 80 m sur le plateau continental portugais par exemple (Dias & Nittrouer, 1984),
- la plate-forme externe (*outer shelf*) dominée par les courants généraux et les ondes internes (Galloway & Hobday, 1983; Davies & Xing, 2002) et située en moyenne entre 60 et 120 m (Nittrouer *et al.*, 1986b) (80 et 150 m de profondeur pour le plateau continental portugais, Dias & Nittrouer, 1984).

Les canyons sous-marins qui incisent la bordure du plateau continental peuvent favoriser le transport des sédiments sableux et fins vers les plus grandes profondeurs (Ruch *et al.*, 1993; Syvitski & Morehead, 1999; Mullenbach & Nittrouer, 2000; Puig *et al.*, 2003). Par exemple, 2 à 3% des sédiments expulsés par la Gironde sont transportés *via* le canyon du Cap Ferret vers les fonds du Golfe de Gascogne (Ruch *et al.*, 1993).



**Figure I-1. a/** Géomorphologie du plateau continental nord-aquitain. Le plateau interne s'étend jusqu'à environ 40 m de profondeur avec une topographie uniforme ; le plateau médian est compris entre 40 m et 80 m avec une topographie marquée par des buttes et ondulations de 1 à 6 m d'amplitude et le plateau externe est compris entre 80 m et 140 m avec une topographie régulière (Cirac et al., 2000).



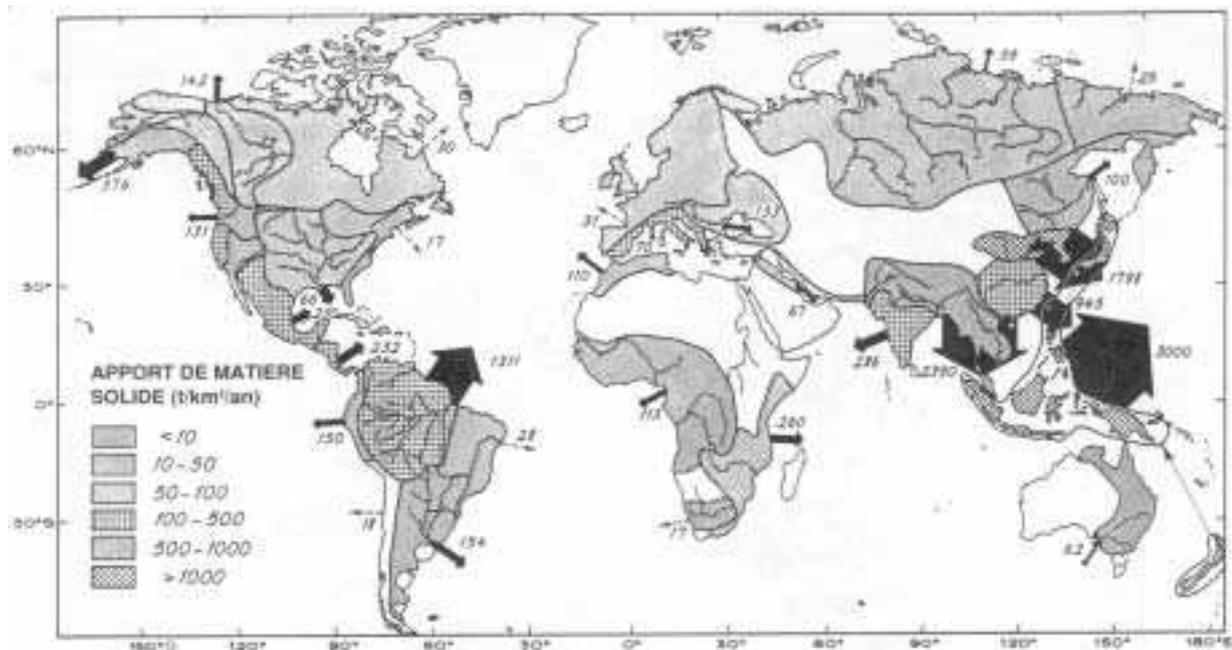
**b/** Carte du plateau continental de l'Amazonie large de 100 à 300 km. Le plateau interne relativement plat jusqu'à 40 m est limité par une rupture de pente vers 60 m (Nittrouer & DeMaster, 1986), tandis que la plate-forme externe est située entre 60 et 100 m de profondeur.

## 1.2 Origine des sédiments fins en contexte de plate-forme continentale

Depuis que le niveau de la mer est stable, soit environ 6000 ans (Fairbanks, 1989), les sédiments fins apportés par les systèmes fluviaux sont souvent piégés dans les zones littorales et sur les plates-formes continentales internes (Drake, 1976). La plus grande partie de cette sédimentation siliciclastique est constituée de vase (i.e. silt et argile) avec seulement en moyenne 10 % de sable (Milliman & Meade, 1983). Cette sédimentation observée actuellement sur de nombreuses plates-formes tend donc à former une couverture vaseuse caractéristique de haut-niveau marin (Nittrouer *et al.*, 1986b; Lesueur, 2001). Au contraire, en période de bas-niveau marin, les plateaux continentaux sont exondés, et d'une manière générale, les particules terrigènes véhiculées par les fleuves gagnent directement les grands fonds (Milliman, 1990).

Sur les dix principaux fleuves du monde (*fig. I-2*), les matières solides qui parviennent au rebord des plateaux continentaux représentent moins de 25% des sédiments transportés, la majorité étant piégée en zone littorale (Milliman & Meade, 1983). Par exemple, la charge sédimentaire véhiculée par les fleuves Huanghe et Changjiang (*fig. I-3*, n°⑨⑩) demeure piégée au sein de leur delta et des zones littorales de la Mer Jaune et de la Mer de Chine orientale. On

ne retrouve que 5 à 15% de ce matériel déposé sur le plateau continental et une très faible proportion atteint le rebord du plateau (Drake, 1976; Milliman *et al.*, 1987).



**Figure I-2.** Apport annuel de charges solides (millions de tonnes par an) en domaine océanique en provenance de grands bassins versants (Milliman & Meade, 1983; Milliman, 1990). Les valeurs très élevées des apports des îles océaniques (Thaïlande, Île du Sud de Nouvelle-Zélande) sont imputables à la multitude des petits cours d'eau qui drainent des bassins versants déstabilisés par une culture intensive.

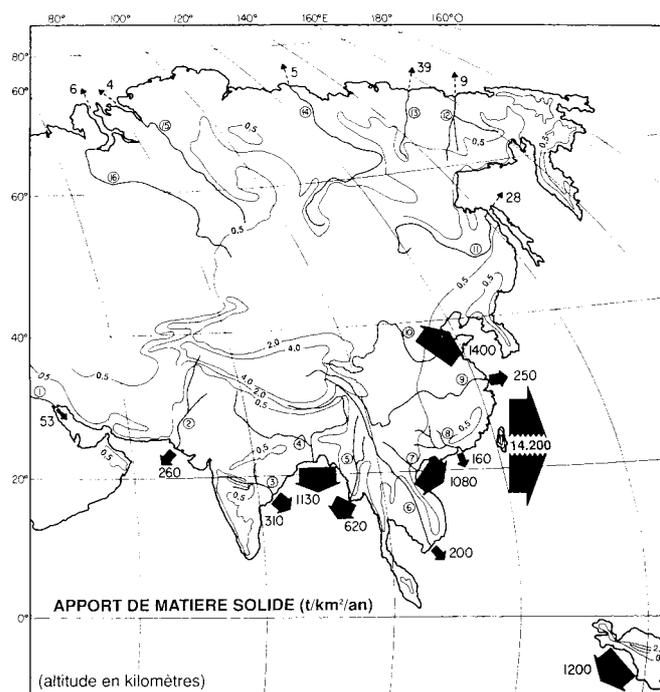
L'importance de l'alimentation terrigène en direction des plateaux continentaux détermine le volume des dépôts sédimentaires. Nittrouer *et al.* (1984-1985) ont proposé une classification des sites de dépôts en domaine de plate-forme en fonction de la quantité moyenne de sédiment délivrée chaque année. D'après ces auteurs, pour les fleuves de faible débit solide ( $< 10^6$  tonnes.an<sup>-1</sup>), les sédiments fins sont surtout piégés dans les estuaires. En effet, à l'Est des Etats-Unis, peu de matières transportées par les cours d'eau atteignent l'océan, la plupart restant piégées dans les vastes estuaires, notamment dans les baies de Chesapeake (Sandford & Halka, 1993; Wright *et al.*, 1997) et de la Delaware (Meade, 1972). Dans le cas de fleuves à plus forte alimentation ( $> 10^6$  à  $10^8$  tonnes.an<sup>-1</sup>), les sédiments sont expulsés loin de leur embouchure pour former des dépôts fins en milieu de plate-forme (rivière Columbia, nord-ouest USA, Nittrouer & Sternberg, 1981). Le taux de sédimentation est généralement faible, inférieur à 5 mm.an<sup>-1</sup>. Pour les fleuves à très gros apports ( $> 10^8$  tonnes.an<sup>-1</sup>) comme l'Amazone ( $10^9$  tonnes.an<sup>-1</sup>), les sédiments fins s'accumulent depuis le rivage jusqu'au milieu de la plate-forme continentale (Kuehl *et al.*, 1984-1985; Kuehl *et al.*, 1986a; Kuehl *et al.*, 1996) et le taux de sédimentation peut atteindre 1 à 10 cm. an<sup>-1</sup> (Nittrouer *et al.*, 1991b). Les dépôts fins en domaine de plate-forme externe sont plus rares puisque limités par la réduction des flux sédimentaires vers le large.

En zone climatique tempérée, les apports terrigènes prédominent largement sur les apports biogéniques. Cependant, dans des contextes environnementaux particuliers, d'autres contributions doivent être envisagées et deviennent parfois même les sources principales des apports. D'une manière générale, les apports sédimentaires fins sur les plateaux continentaux mondiaux sont :

- les matières en suspension (MES) transportées par les fleuves, vers le domaine côtier et expulsées jusqu'à la bordure des plateaux continentaux représentant  $1,5 \text{ à } 2 \times 10^{10}$  tonnes.an<sup>-1</sup> (Milliman & Meade, 1983; Gorsline, 1984; Milliman, 1990). A l'échelle mondiale, l'essentiel de ces apports provient de l'Asie du Sud et de l'Océanie (70% des apports mondiaux, *figs. I-2, I-3 et tabl. I-1*). Toutefois, ces bilans d'apport de matériel solide sont délicats à réaliser compte tenu de la variabilité spatiale et temporelle des flux estimés.

**Figure I-3.** Apports de matières solides en Asie (Milliman & Meade, 1983).

Fleuves d'Asie ① Tigre-Euphrate ② Indus ③ Godavari ④ Gange-Brahmapoutre ⑤ Irrawaddy ⑥ Mékong ⑦ Song Koi (fleuve rouge) ⑧ Rivière des perles ⑨ Changjiang (Yang-tse Kiang) ⑩ Huanghe (fleuve Jaune).



Charge en suspension moyenne annuelle (x 10 <sup>6</sup> tonnes.an <sup>-1</sup> )		
Gange/Brahmapoutre	Inde	1670
Amazone	Brésil	1200
Huanghe (fleuve Jaune)	Chine	1080
Changjiang	Chine	478
Irrawaddy	Birmanie	285
Magdalena	Colombie	220
Mississippi	USA	210
Orénoque	Brésil	210
Song Koi (fleuve Rouge)	Vietnam	160
Mékong	Thaïlande	160
Total		5373
Total Asie		3833

**Tableau I-1.** Classement des principaux fleuves du monde par ordre décroissant de la charge solide fournie (d'après Milliman 1990 et modifié par Wright & Nittrouer, 1995). Les dix plus grands fleuves mondiaux représentent 40% du total mondial des apports en matériel solide. Les fleuves surlignés en gris se situent en Asie du Sud et participent à eux-seuls pour 28% des apports à l'océan mondial dont l'Asie du Sud et l'Océanie procurent 70%. Les fleuves de l'Amérique du sud (Amazone, Orénoque et Magdalena) fournissent 11% du total.

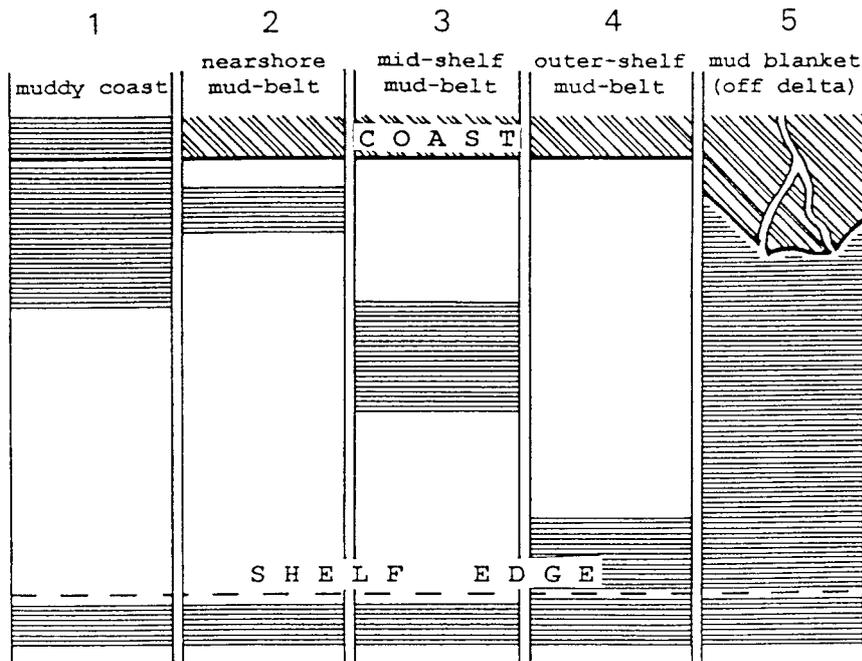
- Selon Gorsline (1984), les autres sources de sédiments fins sont (i) les cendres volcaniques (ii) les apports éoliens et (iii) ceux produits par la production biologique (*tabl. I-2*). Dans ce bilan des sources particulières, l'érosion du littoral et des fonds marins doit être également prise en compte dans le budget sédimentaire en domaine océanique. Des estimations classent ces contributions juste derrière les apports en suspension d'origine fluviale avec un volume annuel de  $0,25 \times 10^9 \text{ t.an}^{-1}$  (Eisma, 1992). L'érosion d'anciens dépôts affleurant dans le domaine marin peut contribuer à fournir une quantité non négligeable d'apports en sédiments fins vers la plate-forme interne. Ainsi, sur la côte d'Amapa (marge amazonienne), Allison *et al.* (1996) ont montré que l'érosion côtière d'argiles reliques (500-1 300 ans BP) générerait un budget annuel de 1 à  $4 \times 10^6$  tonnes, dominant largement les faibles apports fluviaux sur cette partie de littoral. Ces apports constitueraient même la troisième source de sédiments fins dans le bilan sédimentaire global du delta subaquatique de l'Amazone (Allison *et al.*, 1996).

Apports en suspension d'origine fluviale	Erosion littorale	Apports éoliens (cendres volcaniques exclues)	Eruption volcanique	Production biologique
15 à $20 \times 10^9 \text{ t.an}^{-1}$	$0,25 \times 10^9 \text{ t.an}^{-1}$	$0,01 \times 10^9 \text{ t.an}^{-1}$	$0,01 \times 10^9 \text{ t.an}^{-1}$	$10^9 \text{ t.an}^{-1}$
(Milliman & Meade, 1983; Milliman, 1990)	dans Eisma (1992)	(Gorsline, 1984)	(Gorsline, 1984)	(Milliman, 1990)

**Tableau I-2.** Budget sédimentaire mondial des apports en particules fines sur les plates-formes continentales actuelles.

### 1.3 Types de vasières et taux d'accumulation sur les plates-formes continentales mondiales

D'une manière générale, les modèles actuels de sédimentation en domaine de plate-forme tendent à montrer l'accumulation (i) de sédiments grossiers (sables et graviers) sur la plate-forme interne, (ii) de sédiments fins (silts et argiles) en domaine médian et (iii) de sédiments reliques en zone externe (Emery, 1968; Swift, 1970; Swift *et al.*, 1971; Curray, 1973; Nittrouer *et al.*, 1983). Cependant, des sédiments fins peuvent se localiser ailleurs sur la plate-forme continentale (McCave, 1972, 1984) (*fig. I-4*). Les exemples cités dans le tableau I-3 et en figure I-5, non exhaustifs, présentent les zones les mieux connues et les plus communes qui se rencontrent en domaine de plate-forme continentale interne et médiane. La géométrie des plates-formes continentales joue un rôle majeur dans la mise en place des sédiments fins. Si elles sont étroites (e.g. océan Pacifique et Nord-Ouest de l'océan Indien), les matières solides déversées par les cours d'eau sont souvent acheminées vers les grands fonds tandis que celles-ci sont régulièrement piégées dans la zone littorale et interne des larges plates-formes de la marge Atlantique.

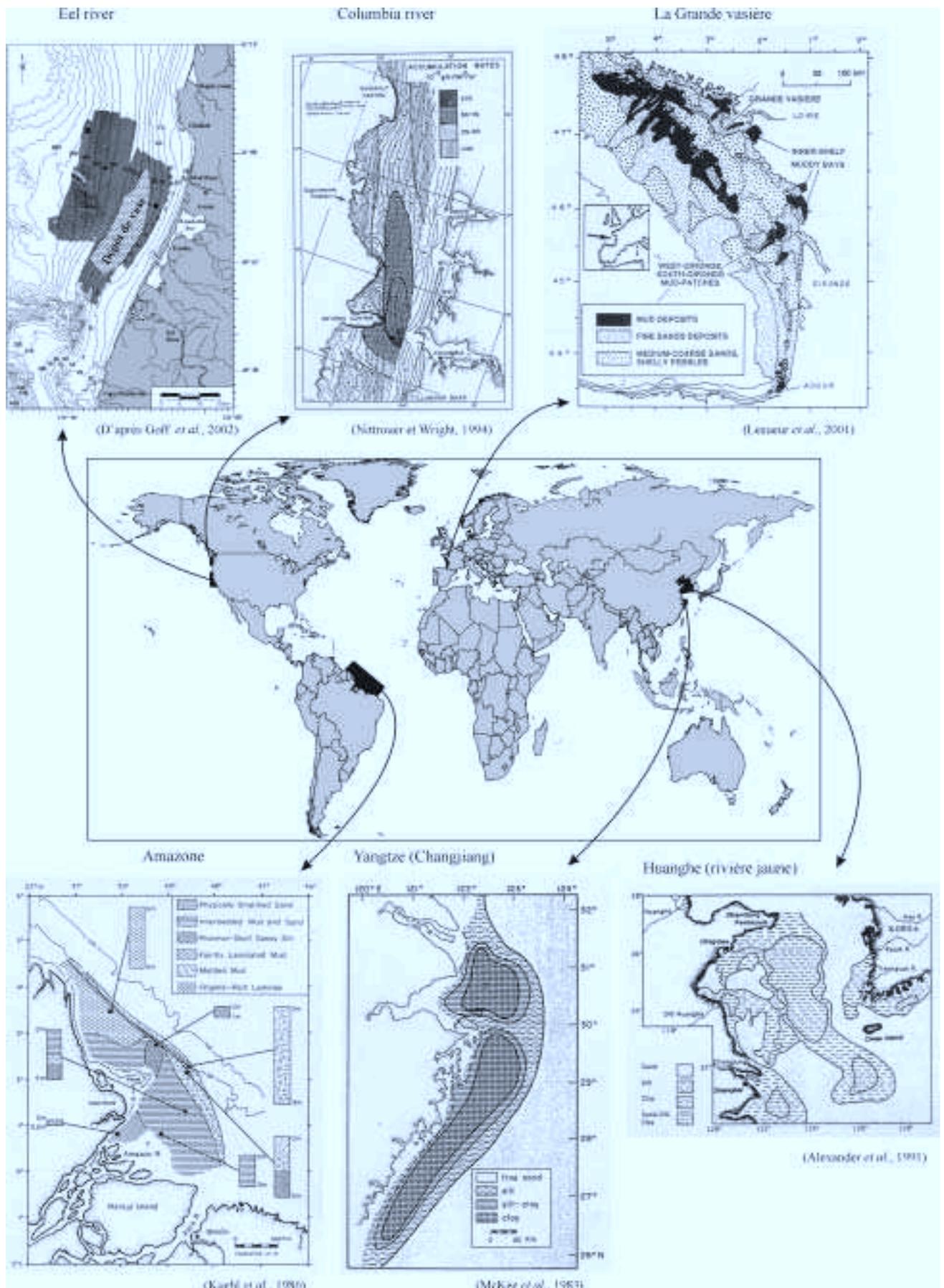


**Figure I-4.** Les cinq cas typiques d'accumulation des vases sur les plates-formes continentales (McCave, 1972).

Les fleuves les plus importants transportant plus de  $10^8$  tonnes.an<sup>-1</sup> correspondent à des taux d'accumulation variant de un millimètre à quelques centimètres par an. C'est le cas de l'Amazone où les différents taux sont:  $\sim 1$  cm.an<sup>-1</sup> près de la côte, 10 cm.an<sup>-1</sup> sur la plate-forme médiane (40-60 m de profondeur),  $< 2$  cm.an<sup>-1</sup> vers les plus grandes profondeurs (offshore,  $> 60$  m) et nulle pour la plate-forme externe recouverte de sables reliques (Nittrouer *et al.*, 1983; Nittrouer & DeMaster, 1986; Nittrouer *et al.*, 1986a; Allison *et al.*, 1995; Nittrouer *et al.*, 1996; Allison & Nittrouer, 1998). Pour les rivières de moindre débit solide ( $< 10^8$  tonnes.an<sup>-1</sup>), les taux de sédimentation sont de l'ordre du millimètre par an (e.g. 5 mm.an<sup>-1</sup> pour la Columbia River, Nittrouer & Sternberg, 1981). A l'échelle mensuelle ou annuelle, ces taux peuvent être toutefois beaucoup plus importants. Ainsi, au large du fleuve Yangtze, plus de 4 cm de vase peuvent se déposer au cours d'une période de 100 jours alors qu'à l'échelle décennale le taux de sédimentation est de seulement 5 cm par an (McKee *et al.*, 1983; Wright *et al.*, 1990). Cette différence résulte de la remise en suspension et du déplacement de la majorité des dépôts fins à caractère saisonnier vers les parties les plus distales du système. McKee *et al.* (1983) soulignent ainsi la distinction essentielle entre dépôt et accumulation sédimentaire. Selon eux, le terme de dépôt doit être réservé aux sédiments mis en place temporairement dans les fonds marins à une échelle de temps inférieure à l'année; l'accumulation est au contraire l'enregistrement stratigraphique sédimentaire d'une alternance d'épisodes de dépôts et de remises en suspension sur une échelle de temps pluri-annuelle ou décennale.

Secteur	Terminologie anglo-saxonne	Exemples	Caractéristiques
Littoraux	Coastal mud flats 10-20 m	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ Mer du Nord (Eisma, 1968, 1981)</li> <li>◇ Mer Adriatique (Boldrin <i>et al.</i>, 1988)</li> <li>◇ Plateau continental Atlantique (Gouleau, 1971b; Pouliquen, 1975)</li> </ul>	Secteurs protégés des houles océaniques
	Muddy coast 0-50 m	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ Côte Ouest du Mississippi (Wright &amp; Nittrouer, 1995)</li> <li>◇ Ouest de l'Amazone et de la Guyane (Pujos &amp; Javelaud, 1991)</li> <li>◇ Mer Jaune (Park &amp; Khim, 1992)</li> <li>◇ Ouest de la Corée (Park <i>et al.</i>, 1986)</li> </ul>	<p>Associé aux plus grands fleuves mondiaux se situant dans les régions côtières intertropicales</p> <p>Accumulations près du littoral</p>
Plate-forme interne	Nearshore mud-belt	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ Littoral Sud de la Californie (Drake, 1976)</li> <li>◇ Littoral hollandais au Nord du Rhin (Eisma, 1968)</li> <li>◇ Plate-forme de la Gironde (Lesueur <i>et al.</i>, 1996)</li> </ul>	Associé aux dépôts les plus distaux de certains fleuves en domaine de plate-forme relativement protégé ou soumis à des apports temporaires importants
Plate-forme médiane	mid-shelf mud-belt	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ Plateau continental atlantique "La Grande vasière" (Lesueur <i>et al.</i>, 2001)</li> <li>◇ Ouest des USA: Columbia river entre -70 et -110 m (Nittrouer <i>et al.</i>, 1979; Nittrouer &amp; Sternberg, 1981), Russian river (McCave, 1972; Drake &amp; Cacchione, 1985)</li> <li>◇ Plateau continental portugais (Dias &amp; Nittrouer, 1984)</li> <li>◇ Plateau continental au large de l'Ebre (Palanques &amp; Drake, 1990)</li> </ul>	<p>Lieu privilégié de la sédimentation fine mondiale (McCave, 1972; Nittrouer &amp; Sternberg, 1981; McKee <i>et al.</i>, 1983; Nittrouer &amp; Wright, 1994)</p> <p>A relier aux épisodes de crues</p>
Plate-forme externe	Outer-shelf mud-belt	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ Nord-Ouest du Golfe du Mexique</li> <li>◇ Orégon, USA</li> <li>◇ Sud de New England (dans, Lesueur, 2001)</li> </ul>	Peu courant, apports de MES qui se déposent en bordure de plate-forme
Plate-forme interne → externe	Mud-blankets	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ Huang Ho (Rhoads, 1974; Nittrouer <i>et al.</i>, 1984; DeMaster <i>et al.</i>, 1985)</li> <li>◇ Mississippi (Shepard, 1932; Coleman <i>et al.</i>, 1998)</li> <li>◇ Rivière Fly (Harris <i>et al.</i>, 1993)</li> <li>◇ Amazone (Kuehl <i>et al.</i>, 1982; Nittrouer <i>et al.</i>, 1983; Kuehl <i>et al.</i>, 1984-1985; Kuehl <i>et al.</i>, 1986a; Kuehl <i>et al.</i>, 1986b; Nittrouer <i>et al.</i>, 1991b; Nittrouer <i>et al.</i>, 1996)</li> </ul>	<p>Seulement aux abords des grands fleuves mondiaux dans le prolongement des deltas (charge solide <math>&gt; 10^8</math> tonnes.an<sup>-1</sup>), plate-forme entièrement tapissée de sédiments vaseux</p> <p>Pour l'Amazone, entre le domaine intertidal et -60 m</p>

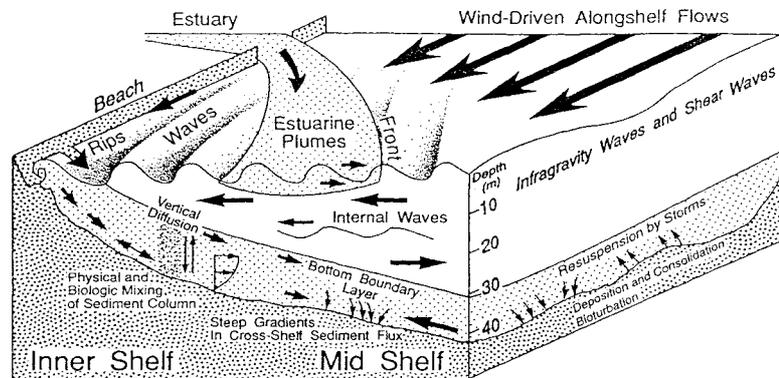
Tableau I-3. Exemples mondiaux de dépôts de sédiments fins sur les différentes parties de la plate-forme continentale.



**Figure I-5.** Exemples de situations des sédiments fins vaseux sur différentes plates-formes mondiales actuelles. En haut, de gauche à droite: l'Eel river, la Columbia river et la "Grande Vasière" du Golfe de Gascogne. En bas, de gauche à droite, l'Amazone, le Yangtze et le Huanghe.

### 1.4 Les mécanismes du contrôle de la sédimentation fine terrigène

Exception faite des fleuves ou des rivières débouchant dans des mers semi-fermées, la plupart des grands systèmes fluviaux aboutissent en contexte hydrodynamique énergétique de plate-forme péricontinentale interne (Wright & Nittrouer, 1995). De la combinaison complexe des processus marins physiques et biologiques résultent la remobilisation et le transfert des sédiments à des échelles spatio-temporelles très diverses liées aux environnements locaux (régimes de marée, vents, houles, ...) (fig. I-6). La présence, la magnitude et la durée de chacun de ces processus jouent un rôle majeur dans la sédimentation fine en domaine de plate-forme. Par exemple, dans le cas des rivières situées à moyenne et haute latitude, les plus fortes charges solides fluviales ont lieu au printemps et peuvent être retardées jusqu'en été, quand la fonte de neige joue un rôle majeur (Nittrouer, 1993). Les variations saisonnières résultent des phénomènes météorologiques et physiques. En effet, il est commun d'observer les périodes les plus énergétiques de vents, de houles et de courants pendant l'hiver. L'importance de la durée des autres processus a aussi été démontrée comme dans le cadre des blooms phytoplanctoniques, des phénomènes d'upwelling (*nutrient upwelling*) ou de l'alimentation du zooplancton et des animaux benthiques.



**Figure I-6.** Diagramme conceptuel illustrant le couplage des processus physiques et biologiques du transport particulaire en domaine de plate-forme interne et médiane (Nittrouer & Wright, 1994).

Dans les systèmes fluviaux, les MES et les éléments dissous qui arrivent en mer le font régulièrement sous la forme de panaches turbides (*rivers plumes*, e.g. Geyer *et al.*, 2003). En surface, le panache turbide se distingue par la coloration brune de la mer liée à de fortes concentrations en MES. Près de la côte, il arrive parfois que des panaches turbides très chargées en matières solides (plusieurs  $\text{g.l}^{-1}$ ) limitent de manière ponctuelle ou saisonnière la pénétration de la lumière, étouffant la production des blooms printaniers phytoplanctoniques (e.g. Amazone ou Changjiang). Bien que la force de Coriolis (rotation de la Terre) fasse dévier l'ensemble des masses d'eau vers la droite dans l'hémisphère nord, d'autres facteurs locaux peuvent néanmoins devenir prépondérants pour orienter la trajectoire du panache de surface: morphologie de la côte (angle entre l'estuaire et la côte, profondeur d'eau), contrastes de salinité, influences des courants et vents. Dans les grands systèmes comme l'Amazone ou le Mississippi, dont les épisodes de forts débits se déroulent sur plusieurs mois, la trajectoire du panache est influencée par des épisodes de basse-fréquence temporelle, par exemple la mousson de récurrence

saisonnaire (Geyer *et al.*, 1991; Kineke *et al.*, 1991; Nittrouer & DeMaster, 1996; Coleman *et al.*, 1998). Dans le cas de crue de très courte durée (quelques jours), les conditions de forçages du panache peuvent être associées à des épisodes météorologiques plus brefs de type tempête (Geyer *et al.*, 2000).

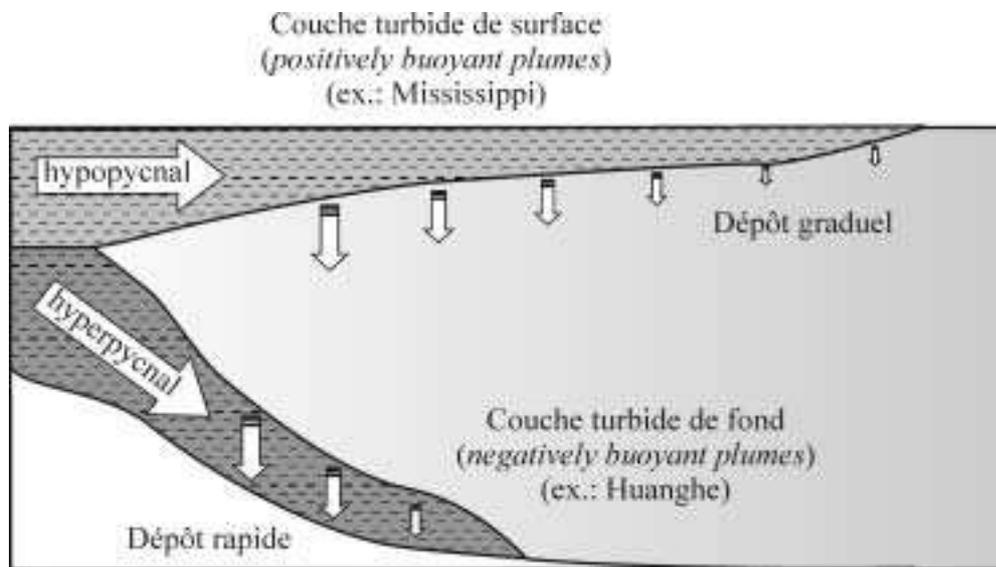
La densité du panache turbide est fonction de la salinité, de la température, de la concentration en MES et, localement, des conditions hydrodynamiques (régime de marée, vents et houles) qui mélangent et homogénéisent la colonne d'eau. Comme ces paramètres évoluent au cours de l'année, on observe des trajectoires de dérive saisonnière du panache turbide. Par exemple, en été, celle de la Columbia river (nord-ouest Pacifique) se déplace en direction du sud sous l'influence des vents et courants marins. En hiver, par contre, la trajectoire du panache est influencée par des vents contraires et emprunte une direction inverse vers le nord (Nittrouer, 1993). La direction du panache est importante car elle contraint la destination finale des matériaux ainsi transportés.

Dans les secteurs profonds ou protégés des houles et courants, la sédimentation rapide des MES du panache peut donner lieu à la formation d'un dépôt de vase fluide non consolidé (*fluid mud*) sur le fond. Classiquement, on distingue selon le mode d'écoulement de la masse turbide dans la colonne d'eau deux types de couches turbides (*fig. I-7*):

(1) une couche turbide de surface (*surface nepheloid layer*) responsable de l'advection des MES vers le large. C'est le type le plus commun aux embouchures de la plupart des fleuves actuels. Cette couche turbide de faible salinité progresse sous forme d'un écoulement de type hypopycnal. Cette couche de surface se limite à la plate-forme interne et médiane puis est déviée parallèlement à la côte par la force de Coriolis (Nittrouer, 1993; Oliveira *et al.*, 2002).

(2) une couche turbide de fond (*bottom nepheloid layer*) permettant le transport des sédiments fins (jusqu'à  $10 \text{ g.l}^{-1}$ ). Cette couche est de densité plus élevée que les eaux marines créant ainsi sur le fond un courant de type hyperpycnal (*underflowing*). Se basant sur 230 fleuves/rivières, Mulder et Syvitski (1995) estiment que 66% d'entre eux sont capables de produire des courants hyperpycniaux à caractère turbiditique vers les plates-formes continentales en raison des très fortes concentrations en MES pouvant être associées à des crues exceptionnelles. Les courants hyperpycniaux sont donc communs à de nombreux fleuves dans le monde (Parsons *et al.*, 2001) et plus particulièrement au niveau des grands systèmes fluviaux mondiaux soumis à des épisodes extrêmes (e.g.: crues exceptionnelles de type décennale ou séculaire) (Nittrouer & Wright, 1994). Ces courants peuvent être soutenus pendant quelques heures, semaines ou mois et devenir ainsi un mécanisme majeur du transport sédimentaire vers les océans. Les sédiments fins transportés par ces courants hyperpycniaux peuvent parcourir de très grandes distances, parfois relayés par la présence de canyons sous-marins (Drake, 1976; Ruch *et al.*, 1993; Mullenbach & Nittrouer, 2000; Liu *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2002). Certains grands fleuves comme l'Amazone (Kineke *et al.*, 1991) ou le Mississippi (Wright & Nittrouer,

1995) peuvent donner naissance aux deux types d'écoulement en période de crue, hyper- et hypopycnaux.



**Figure I-7.** Schéma conceptuel des deux types de panache turbide pouvant exister en mer (modifié d'après Wright & Nittrouer, 1995). Des courants hyperpycnaux doivent également se produire au niveau du fleuve Mississippi en période de débits soutenus, expliquant ainsi les taux d'accumulation élevés au large.

### 1.5 Les dépôts de vase sur la plate-forme continentale française nord-européenne

Malgré les conditions macrotidales (Manche) et/ou une sédimentation fine soumise aux fortes houles de tempêtes (Atlantique), des dépôts de sédiments fins se mettent en place sur la plate-forme continentale française européenne dans des environnements à priori peu propices à leur conservation (Lesueur *et al.*, 2002). Aloisi *et al.* (1977) constatent que, sur les plateaux continentaux français, les vasières ont des caractéristiques communes de mise en place, associées (i) aux périodes de stabilisation du niveau marin, (ii) aux ruptures de pente et (iii) aux embouchures fluviales.

#### 1.5.1 La plate-forme atlantique

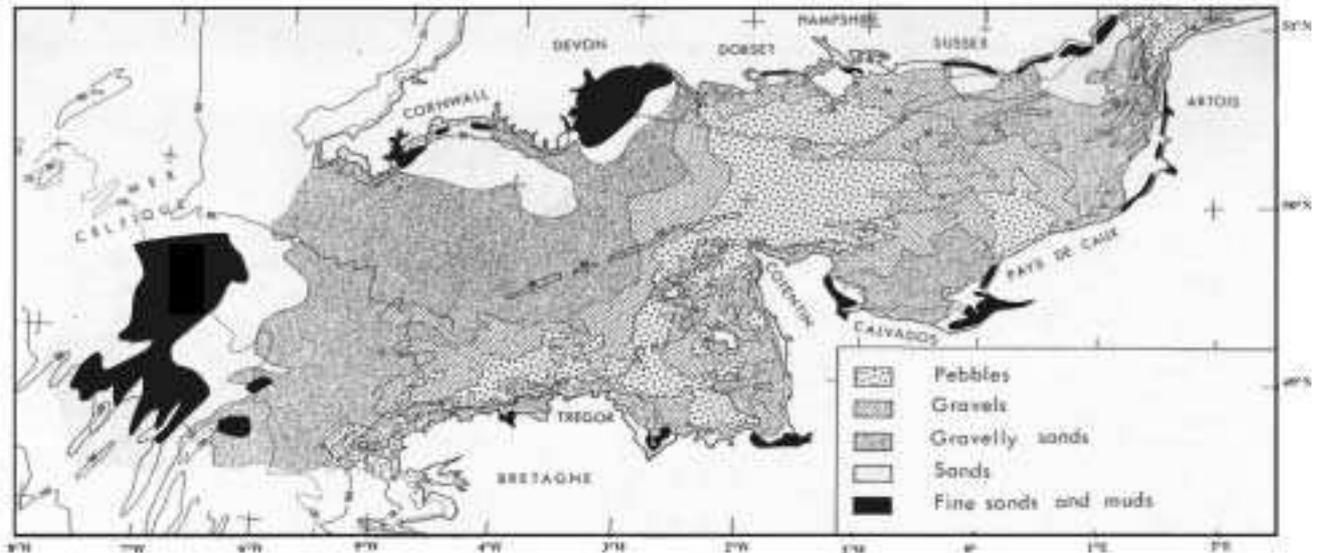
Sur la plate-forme atlantique, les sites de dépôt des sédiments fins se répartissent depuis le domaine littoral jusqu'au milieu de la plate-forme à -150 m (Lesueur *et al.*, 2002). Ils correspondent à des vasières intertidales et subtidales du domaine de plate-forme interne (*inner-shelf muddy bays*). Les dépôts les plus littoraux se situent dans les secteurs de baies protégées comme la Baie de Quiberon et de la Vilaine, la Baie de Bourgneuf (Gouleau, 1968, 1971a, b), la Baie de l'Aiguillon (Verger, 1970) et les Pertuis charentais (Pouliquen, 1975;

Garnaud, 2002). Le reste de la plate-forme ouverte du Golfe de Gascogne semble peu propice au dépôt de sédiments fins. Néanmoins, c'est une vaste étendue de sédiments envasés, dite "la Grande Vasière", qui domine les fonds marins, centrée sur l'isobathe -100 m allongée parallèlement au rivage sur une distance de plus de 250 km entre la pointe de Penmarc'h et le haut-fond de Rochebonne (*fig. I-5, p. 21*). Ses limites sont variables et sa superficie peut diminuer de moitié en période hivernale lors de la redistribution des sédiments fins par les fortes houles de tempêtes (Pinot, 1974). Cette vasière est typique d'un dépôt en domaine de plate-forme médiane (*mid-shelf mud-belt*) d'après la classification de McCave (1972). Au Sud et à l'Ouest de la Gironde, des vasières en situation intermédiaire (*near shelf mud-belt*) s'observent entre -10 et -70 m de profondeur sous la forme de dépôts fins bien individualisés (Lesueur *et al.*, 2001). Des dépôts temporaires de sédiments fins à caractère saisonnier ont également été décrits au Nord (Castaing, 1981) et au Sud (Bouchet, 1987) de l'embouchure de la Gironde, voire même dans l'embouchure (Mallet, 1998).

### 1.5.2 La Manche

La répartition des sédiments superficiels en Manche est essentiellement contrôlée par le régime de marée macrotidal qui génère des courants extrêmement forts le long des côtes bretonnes et en Manche centrale. De ce fait, les fonds de la Manche sont principalement caractérisés par une vaste couverture caillouteuse (Larsonneur *et al.*, 1982). Comme sur tout le plateau continental NW européen, le contexte macrotidal cantonne le dépôt permanent des sédiments fins aux secteurs de baies et d'estuaire (*fig. I-8*) permettant la décantation (Bourcart, 1939; Bourcart & Francis-Bœuf, 1942; Vaslet *et al.*, 1978; Larsonneur *et al.*, 1982; Eisma & Kalf, 1987). Les aires de dépôt de sédiments fins sont rares puisqu'elles représentent moins de 4% de la surface totale des fonds de la Manche (Lafite, 2000). Néanmoins, localement, il est possible de rencontrer des sédiments fins (1) piégés dans des sédiments grossiers hétérométriques ou par des éléments biogènes à forte porosité comme le maërl dans le golfe normand-breton, ou (2) associés à une densité faunistique benthique importante (Thiébaud *et al.*, 1997; Ehrhold *et al.*, 1998).

Dans l'ensemble de la Baie de Seine, les sédiments fins sont surtout représentés à des profondeurs situées entre -6 et -9 m, correspondant à une zone d'énergie turbulente minimale, entre la zone d'action dominante des vagues à la côte et celle des courants de marée au large (Larsonneur, 1971). Dans ce contexte, Avoine (1981) décrit la présence éphémère de vases dans le domaine subtidal ouvert de la Baie de Seine orientale sous la forme de minces placages diffus de vase.



**Figure I-8.** Carte des principaux faciès sédimentaires en Manche et des aires de dépôt des sédiments fins (Larsonneur et al., 1982).

## 2. Caractéristiques générales de la Baie de Seine

Dans le contexte des exemples cités précédemment, la Baie de Seine s'inscrit comme étant une plate-forme à faible taux de sédimentation, en milieu macrotidal. La Seine transporte une charge solide annuelle estimée à 600 000-700 000 tonnes par an (Lesourd, 2000), sans aucune commune mesure avec celles des grands fleuves mondiaux. Si les sédiments sont en partie expulsés vers la Manche, les fonds adjacents de l'embouchure de la Seine peuvent néanmoins, dans des conditions spécifiques, présenter des envasements temporaires importants pouvant recouvrir de larges surfaces dans le domaine oriental (Avoine, 1981; Ehrhold & Auffret, 2002). La particularité de la Baie de Seine vient également de son régime de marée macrotidal qui induit des couplages de transferts de matières importants entre l'estuaire, principale source de matière particulaire et les fonds marins adjacents.

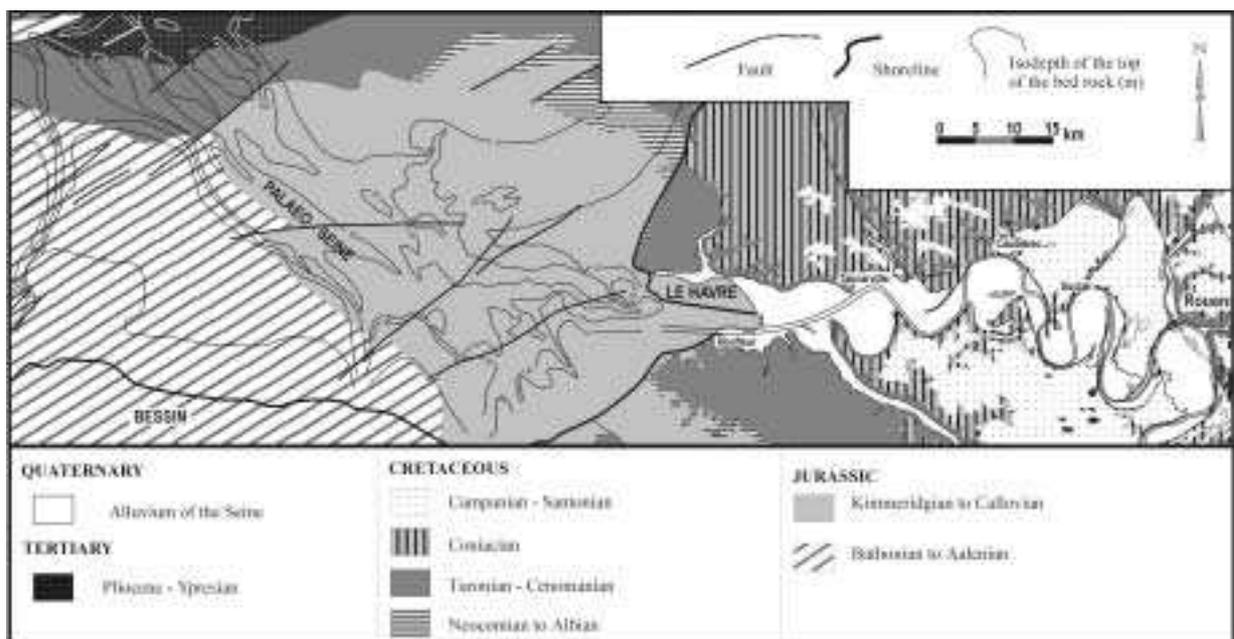
D'une superficie d'environ 5 000 km<sup>2</sup>, la Baie de Seine, profonde au maximum de 40 m, est largement ouverte vers la Manche. Elle concentre une forte activité anthropique à la fois portuaire et économique: tourisme, pêche et conchyliculture. Dans sa partie orientale, elle reçoit directement les eaux de la Seine, qui draine un bassin versant de 75 000 km<sup>2</sup> où se concentrent 40% des activités économiques françaises et 26% de la population. La Seine est ainsi le principal vecteur de polluants tant métalliques qu'organiques qui font d'ailleurs l'objet d'une étude approfondie lors du programme Seine-Aval I et II (e.g., Chiffolleau *et al.*, 1999; Servais *et al.*, 1999; Chiffolleau, 2001).

## 2.1 Cadre géologique et morphologique

### 2.1.1 Substratum anté-holocène

En Baie de Seine, les affleurements du substratum mésozoïque sous-marin sont rares, souvent masqués par des formations meubles (Larsonneur, 1971). Les affleurements terrestres triasiques et jurassiques s'ordonnent en série monoclinale à pendage NE à ENE depuis le Cotentin jusqu'à la région havraise (*fig. I-9*). Ils se prolongent en Baie de Seine avec des faciès identiques à ceux des formations connues sur la côte normande. Les principaux accidents tectoniques sont de longues failles généralement E-W.

Les terrains jurassiques, qui constituent l'essentiel du substratum rocheux de la Baie de Seine, couvrent de larges surfaces en Manche centrale. D'anciens profils sismiques soulignent que le Callovien occupe de vastes surfaces dans la partie centrale de la Baie de Seine, notamment sous la paléovallée de la Seine (Larsonneur, 1971); des forages au large du Havre ont permis d'atteindre la base du Callovien supérieur (Lefebvre, 1977). Dans l'avant port du Havre et l'estuaire de la Seine, le bed-rock est constitué par les marnes noires de Villerville de l'Oxfordien supérieur. Le Kimméridgien affleure seulement dans la partie havraise et le Portlandien n'apparaît que plus à l'est dans les sondages de la région rouennaise. Enfin, les terrains crétacés se rencontrent au sommet des hautes falaises de Villerville et du Havre (falaises de craie cénomanienne) jusqu'à Rouen (*fig. I-9*).



**Figure I-9.** Carte simplifiée des formations géologiques de la Baie de Seine (Lesueur et al., 2003).

## 2.1.2 Histoire quaternaire de la Baie de Seine

### 2.1.2.1 Paléovallées de la Baie de Seine

Le stade glaciaire Weichsélien (80 000 – 18 000 ans BP), à l'origine de la dernière baisse du niveau marin, a provoqué une considérable incision des paléorivières dans le substratum mésozoïque de la Baie de Seine où un système complexe de paléovallées à chenaux anastomosés s'est développé en Manche centrale et orientale ainsi qu'en Baie de Seine (*fig. I-10*). Ce réseau de paléovallées reçoit un ensemble diffus d'affluents venus de l'est associé à des réseaux fluviaux anciens de la Seine, de la Somme et à des rivières se jetant en Manche orientale.

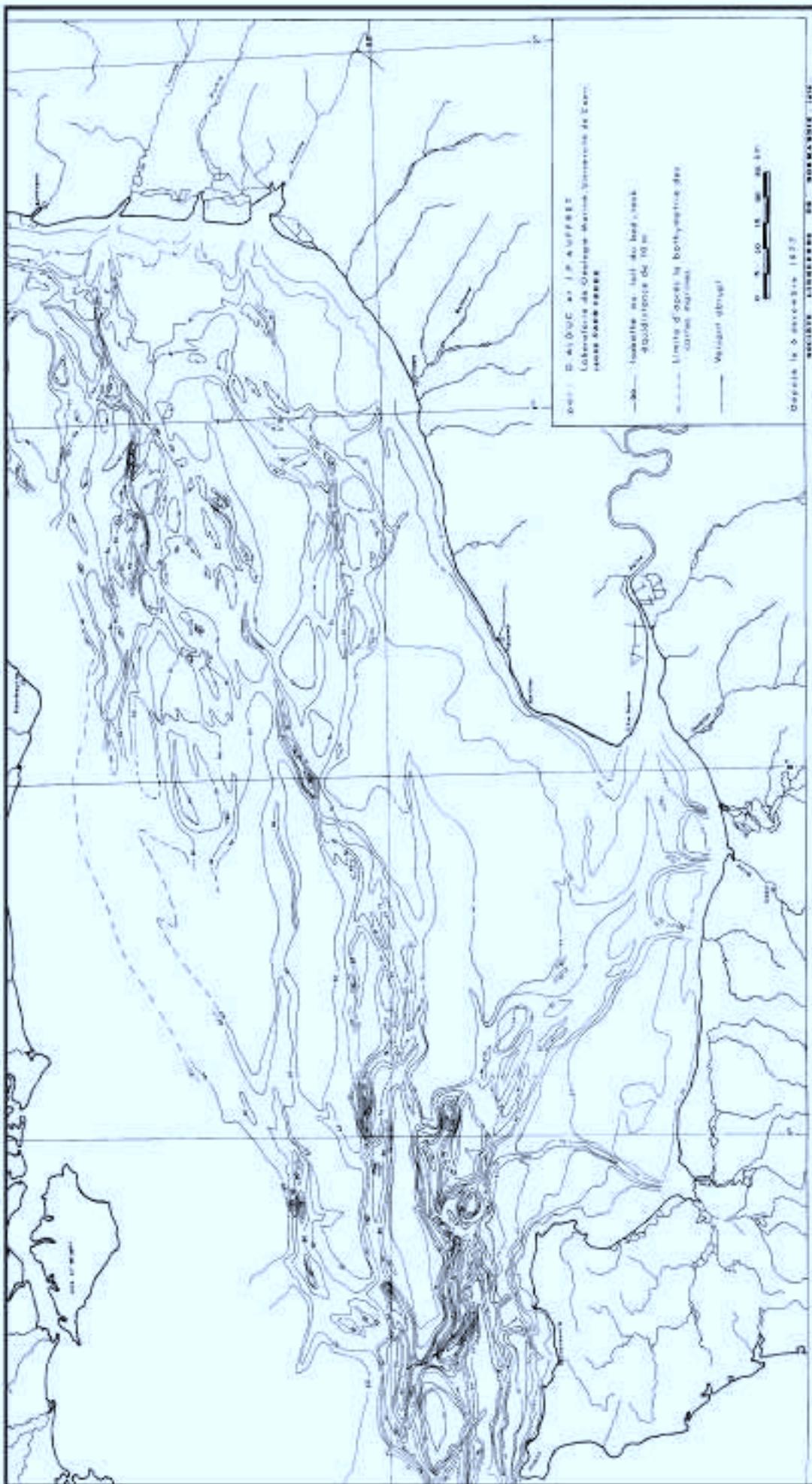
Ce système de paléovallées est sans commune mesure avec le réseau hydrographique actuel et a permis de transporter des masses énormes d'alluvions. Certaines de ces paléovallées ramifiées au nord du Cotentin sont localement surcreusées à -110 m CM (fosse de la Hague) et -137 m CM (fosse du Cotentin). Elles se rejoignent à l'ouest au niveau de la fosse centrale de la Manche (*fig. I-10*) pour ne former qu'un paléofleuve unique "le fleuve Manche" qui se dirige vers la Manche occidentale (Laudridou *et al.*, 1999).

La Baie de Seine reste actuellement marquée par une large dépression NW-SE conduisant au Parfond, cicatrice héritée de l'ancienne paléovallée de la Seine. Le surcreusement du bed-rock par la paléo-Seine weichsélienne a été considérable: -20 m CM à Tancarville, -30 m CM au Havre et à Honfleur, -45 m CM au Parfond et -70 m CM au nord du Cotentin (*fig. I-10*). Ces valeurs soulignent une pente moyenne de la paléovallée de Seine de l'ordre de 0,2 à 0,3 ‰ contre 0,03 ‰, actuellement mettant ainsi en évidence la puissante énergie de l'ancien fleuve (Auffret & Larsonneur, 1977; Laudridou *et al.*, 1999). Il en est ainsi pour toutes les rivières situées le long de la côte du Calvados qui ont été incisées au même titre que la Seine, avec un bed-rock qui s'abaisse à -30 m au niveau de l'embouchure de l'Orne et -37 m à 15 km au N de Ouistreham.

### 2.1.2.2 La transgression flandrienne pendant l'Holocène

L'histoire quaternaire récente est marquée par un remblaiement sédimentaire lié à la remontée marine il y a 18 000 ans BP. Les points marquants de cette période sont:

- 1) l'élévation du niveau marin, incluant la transgression flandrienne,
- 2) la modification du couvert végétal en relation avec le réchauffement climatique amorcé à la fin du Pléistocène (Tardiglaciaire) se poursuivant durant l'Holocène (Postglaciaire),



**Figure I-10.** Plate-forme émergée de la Manche lors de la dernière période glaciaire. Extrait de la carte bathymétrique du toit du bed-rock de la manche orientale (Alduc & Auffret, 1979).

3) un changement des conditions de sédimentation. Pendant le Tardiglaciaire, des sédiments terrigènes riches en matière organique se sont déposés dans des dépressions marécageuses. Ces dépôts ont ensuite alors été en partie érodés, remaniés et recouverts à la fin du Boréal par des sédiments fluvio-marins (Morzadec-Kerfourn & Delibrias, 1972).

A la fin du dernier maximum glaciaire (glaciation weichsélienne), daté de 20-21 000 ans BP, le niveau marin a chuté de -100 à -120 m par rapport au niveau actuel. La Baie de Seine et la Manche orientale, dont les profondeurs excèdent rarement 50 m actuellement, étaient alors exondées. La remontée de la mer s'amorce vers 16 000 ans BP (Larsonneur, 1971, 1977). Vers 15 000 ans BP, la cote -100 m est atteinte et vers 10 000 ans BP (Préboréal, *tabl. I-4*), la mer atteint -40 à -50 m; la remontée du niveau marin progresse alors rapidement au Boréal ( $1 \text{ cm.an}^{-1}$ , -30 m vers 8 000 BP) pour atteindre -10 m au Subatlantique ( $2 \text{ cm.an}^{-1}$ , 7 000 ans BP). Le niveau s'élève ensuite plus lentement jusqu'à 2 000 - 2 500 ans BP, époque à laquelle le niveau marin actuel est approximativement atteint. De brefs épisodes de stabilisation, voire régressifs, s'intercalent durant cette période de transgression (Lefebvre *et al.*, 1974; Clet-Pellerin *et al.*, 1976; Morzadec-Kerfourn, 1995).

Périodes climatiques	(Morzadec-Kerfourn, 1995; Cyprien & Visset, 2002)	(Leroy, 1997)
Subatlantique	Actuel – 3 600 BP	Actuel – 2 700 BP
Subboréal	3 600 – 5 700 BP	2 700 – 5 200 BP
Atlantique	5 700 – 7 800 BP	4 700 – 8 000 BP
Boréal	7 800 – 9 000 BP	8 000 – 9 000 BP
Préboréal	9 000 – 10 300 BP	9 000 – 10 300 BP
Tardiglaciaire	10 300 – 15 000 BP	10 300 – 15 000 BP

**Tableau I-4.** Chronologie de la période postglaciaire.

Au cours de sa progression, la transgression flandrienne a érodé, remanié et redistribué les anciens dépôts terrigènes accumulés en Baie de Seine. La morphologie côtière de la Baie de Seine se dessine dès 7 000 ans BP. Après cette date, les modifications sont peu importantes de telle sorte que la distribution granulométrique des dépôts a subi peu de changements puisque les conditions hydrodynamiques, en particulier de marée, sont similaires à celles d'aujourd'hui (Auffret & Larsonneur, 1975).

Le paléolit de la Seine, établi au début de l'Holocène, est tapissé de dépôts fluviaux tardiglaciaires (9 000 ans BP) principalement formés de cailloutis (Auffret & Larsonneur, 1977; Auffret *et al.*, 1980). Les matériaux les plus grossiers (sables graveleux ou cailloutis)

des fonds marins de la Baie de Seine et de l'estuaire sont hérités des phases glaciaires pléistocènes (Lefebvre *et al.*, 1974). Ce remblaiement holocène forme les dépôts qui affleurent souvent au fond de l'actuel chenal de la Seine mais également sur certains secteurs des fonds de la Baie de Seine (Avoine, 1981) et le long des plages du Calvados, en particulier à Asnelles (Larsonneur, 1977; Clet-Pellerin *et al.*, 1987; Lautridou *et al.*, 1987).

### 2.1.3 Couverture sédimentaire actuelle de la Baie de Seine

Les nombreux prélèvements superficiels réalisés dans l'ensemble de la Baie de Seine au cours des années 1960 à 1971 (*fig. I-11*) ont permis de cartographier la couverture sédimentaire des fonds marins (Vaslet *et al.*, 1978). C'est cependant le secteur de la Baie de Seine orientale qui, depuis 1980, a fait l'objet des plus nombreuses études sédimentologiques dans le cadre de divers programmes (SAUM, GDR Manche, FLUXMANCHE, PNEC, Seine-Aval): embouchure de la Seine (Avoine, 1981; Larsonneur & Avoine, 1981; Avoine *et al.*, 1984; Lesueur & Lesourd, 1999; Lesourd, 2000; Lesourd *et al.*, 2001; Garnaud *et al.*, 2002; Lesourd *et al.*, 2003; Garnaud *et al.*, soumis), partie nord-orientale (Crevel, 1983) et estuaire de l'Orne (Dubrulle, 1982; Dubrulle & Larsonneur, 1984).

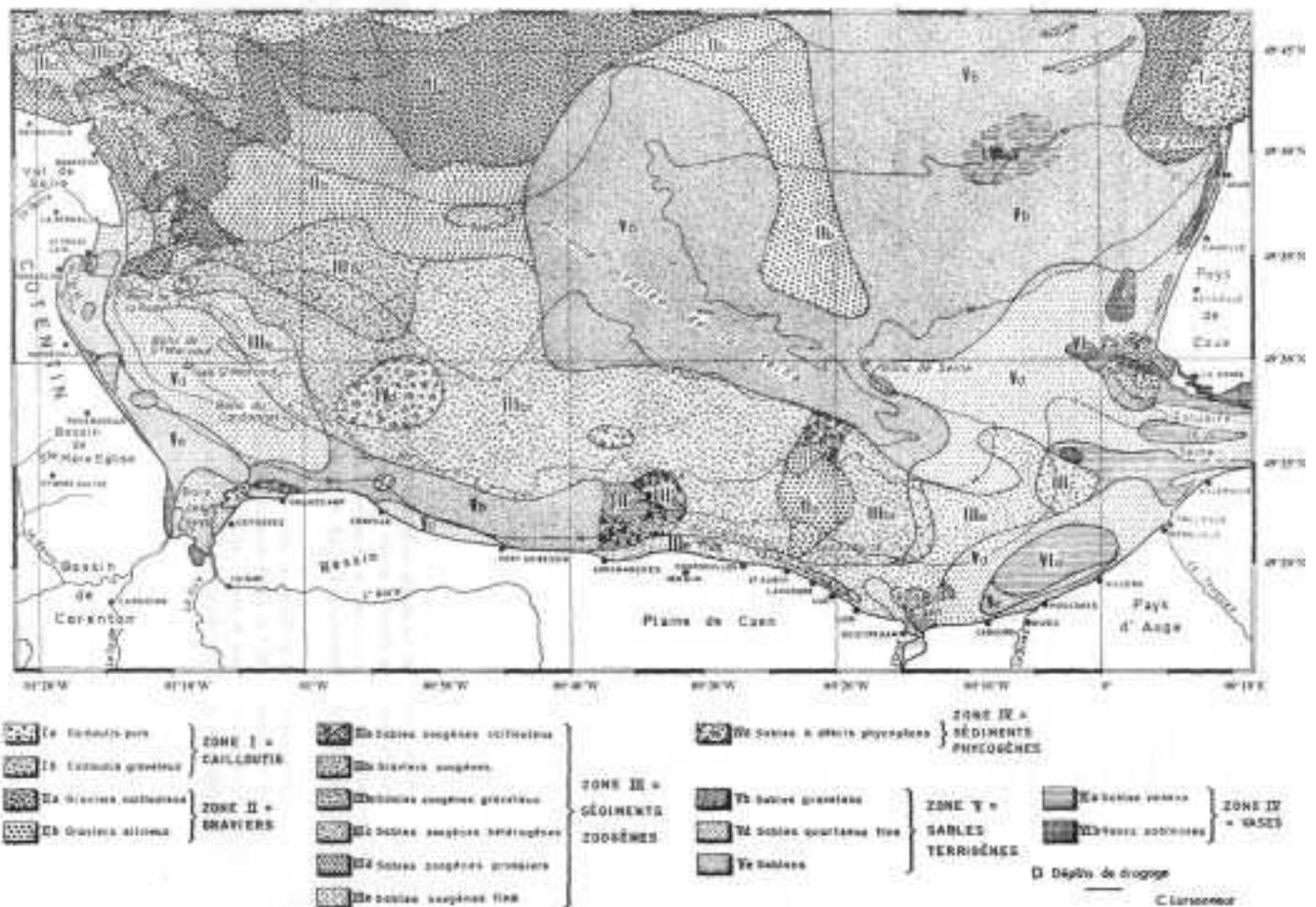
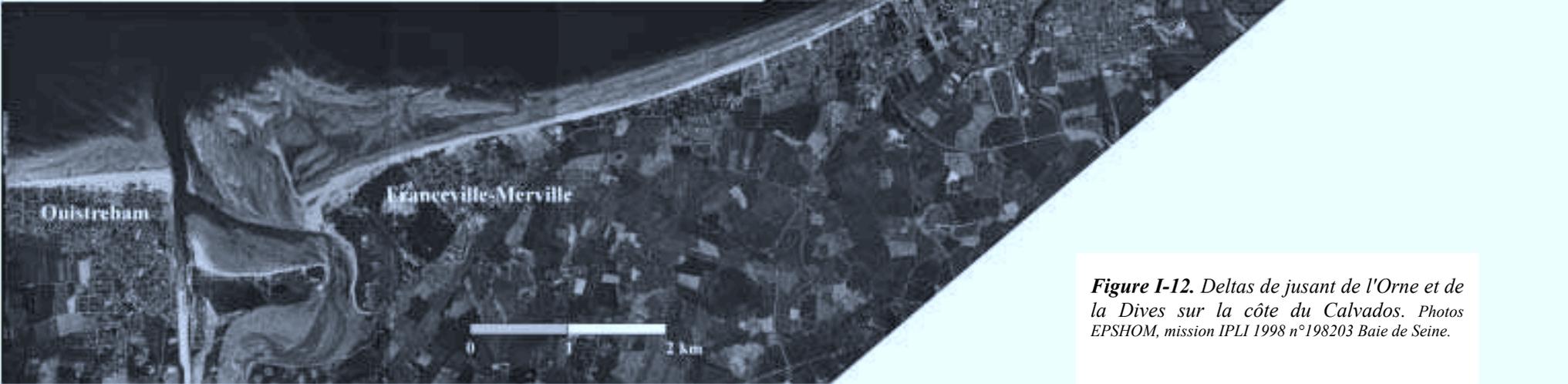


Figure I-11. Carte des sédiments superficiels de la Baie de Seine (Larsonneur, 1977).

En baie occidentale et centrale, ce sont des fonds marins constitués de sédiments sablo-graveleux ou graveleux qui occupent de larges surfaces (Larsonneur, 1969; Ehrhold, 1992, 1993). Le manque marqué d'études sédimentologiques dans cette partie de la Baie de Seine s'explique par le fait que les fonds sont monotones, grossiers et que les apports fluviaux de la Seine sont quasi-inexistants (*fig. I-11*). Du centre de la baie vers l'estuaire de la Seine, un gradient d'affinement granulométrique se superpose étroitement à la diminution des vitesses des courants de marée (Larsonneur & Hommeril, 1967; Larsonneur, 1972). Dans la partie sud-orientale de la baie, les dépôts meubles sont représentés par des sables fins, des sables vaseux, des vases sableuses et des vases (*fig. I-11*). Dans la partie nord-orientale du Pays de Caux, les dépôts grossiers, graveleux à caillouteux annoncent les fonds de la Manche orientale qu'ils tapissent.

Dans l'ensemble de la Baie de Seine, les fonds sont relativement plats, à l'exception des secteurs où des bancs sableux se mettent en place (*fig. I-11*): banc de Seine, bancs de Saint Marcouf et du Cardonnet, de Barfleur ou ridins d'Antifer. Ces accumulations sédimentaires peu étudiées se sont probablement édifiées au cours de la transgression flandrienne, comme les bancs sableux similaires de la façade de la Manche (Berné *et al.*, 1988; Berné *et al.*, 1989; Berné, 2002). Des accumulations sableuses littorales sont également visibles sur la côte du Calvados au débouché de l'Orne et de la Dives formant des deltas de jusant (*fig. I-12*). Bien que situés à l'embouchure de l'Orne et de la Dives, ces deltas sont formés essentiellement de sables marins, construits sous la dérive littorale W→E (Auffret & d'Ozouville, 1986).

C'est à proximité de la frange côtière et aux deux extrémités de la Baie de Seine que les sédiments fins sont les mieux représentés. Les sédiments vaseux restent cependant peu répandus puisqu'ils représentent moins de 5 % de la superficie de la Baie (Lafite, 1990). Ils se localisent principalement dans ses parties protégées et dans les estuaires adjacents (Baie des Veys, St Vaast-La-Hougue, estuaire de la Seine).



*Figure I-12. Deltas de jusant de l'Orne et de la Dives sur la côte du Calvados. Photos EPSHOM, mission IPLI 1998 n°198203 Baie de Seine.*

## 2.2 Hydrologie et hydrodynamisme de la Baie de Seine

### 2.2.1 Caractéristiques de la marée et des courants associés

La mer de la Manche est le siège d'une onde de marée progressive venue de l'Atlantique qui se propage vers le Pas-de-Calais (SHOM, 1968, 1996). La Baie de Seine est soumise à un système semi-diurne de marée macrotidal, et même hypertidal (Allen, 1993), avec des marées de forte amplitude dont le marnage supérieur à 4 m atteint 8 m en période de grandes vives-eaux au Havre. L'onde de marée est déformée en Baie de Seine en raison des faibles profondeurs rencontrées. Ainsi, les marées du Havre et de la Seine maritime se caractérisent par une période de flot (5 heures) plus courte que la période du jusant (7h30) et par une étale de pleine mer d'environ 3 heures appelée "tenue du plein" (Le Floch, 1961), provoquée par une oscillation transversale du bassin côtier allant de la Baie de Seine aux côtes anglaises (Chabert d'Hières & Le Provost, 1978; Le Provost *et al.*, 1986). Ce phénomène apparaît par l'entrée en résonance de l'onde semi-diurne (dite M2, 12h25') avec l'onde quart-diurne (dite M4, 6h13').

La présentation des caractéristiques des courants de marée de surface synthétise à la fois les travaux portant sur des mesures *in situ* obtenues par des courantomètres (SHOM, 1968, 1996) et les résultats de modèles mathématiques (Le Hir, 1980; Le Hir *et al.*, 1985; Le Hir & L'Yavanc, 1985). Ainsi, les eaux superficielles répondent au schéma suivant pendant le cycle de marée (*fig. I-13*):

#### Début de jusant → mi-jusant (BM -3 à BM -1, *fig. I-13a*)

Après l'étale de pleine mer d'environ 3 heures, les courants de jusant s'établissent progressivement du nord au sud de la baie orientale. Les courants longent les côtes en direction du SW devant le pays de Caux et de l'W devant la côte du Calvados. Au Nord de l'embouchure de la Seine, une zone de confrontation s'installe entre les courants de jusant arrivant du Cap de la Hève et les courants de vidange de la Seine.

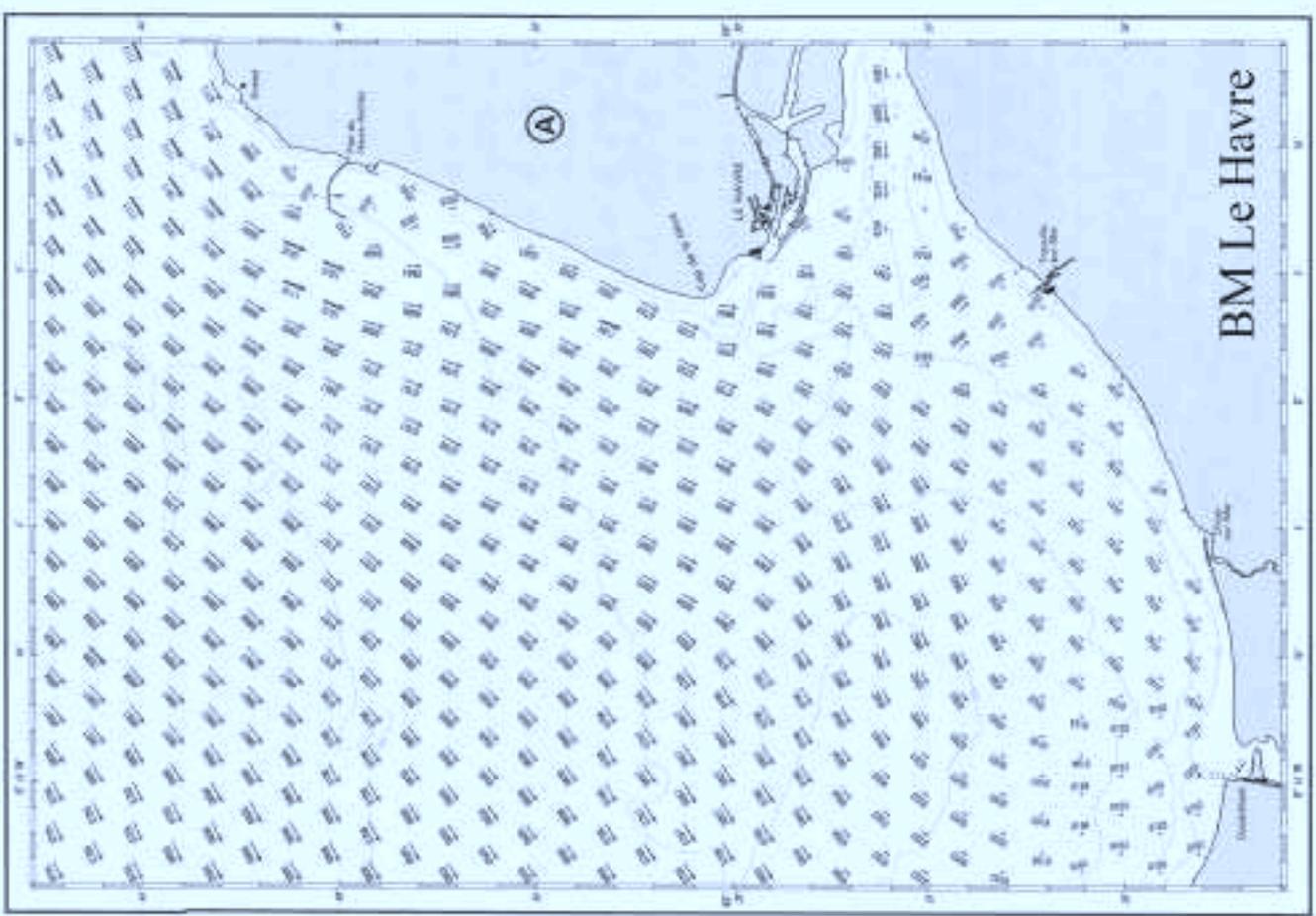
#### Fin de jusant (BM, *fig. I-13b*)

L'estuaire de la Seine va commencer à se remplir alors que les courants de jusant longent les côtes du pays de Caux (courant d'Antifer). La direction des courants commence à s'inverser en Baie de Seine sud-orientale.

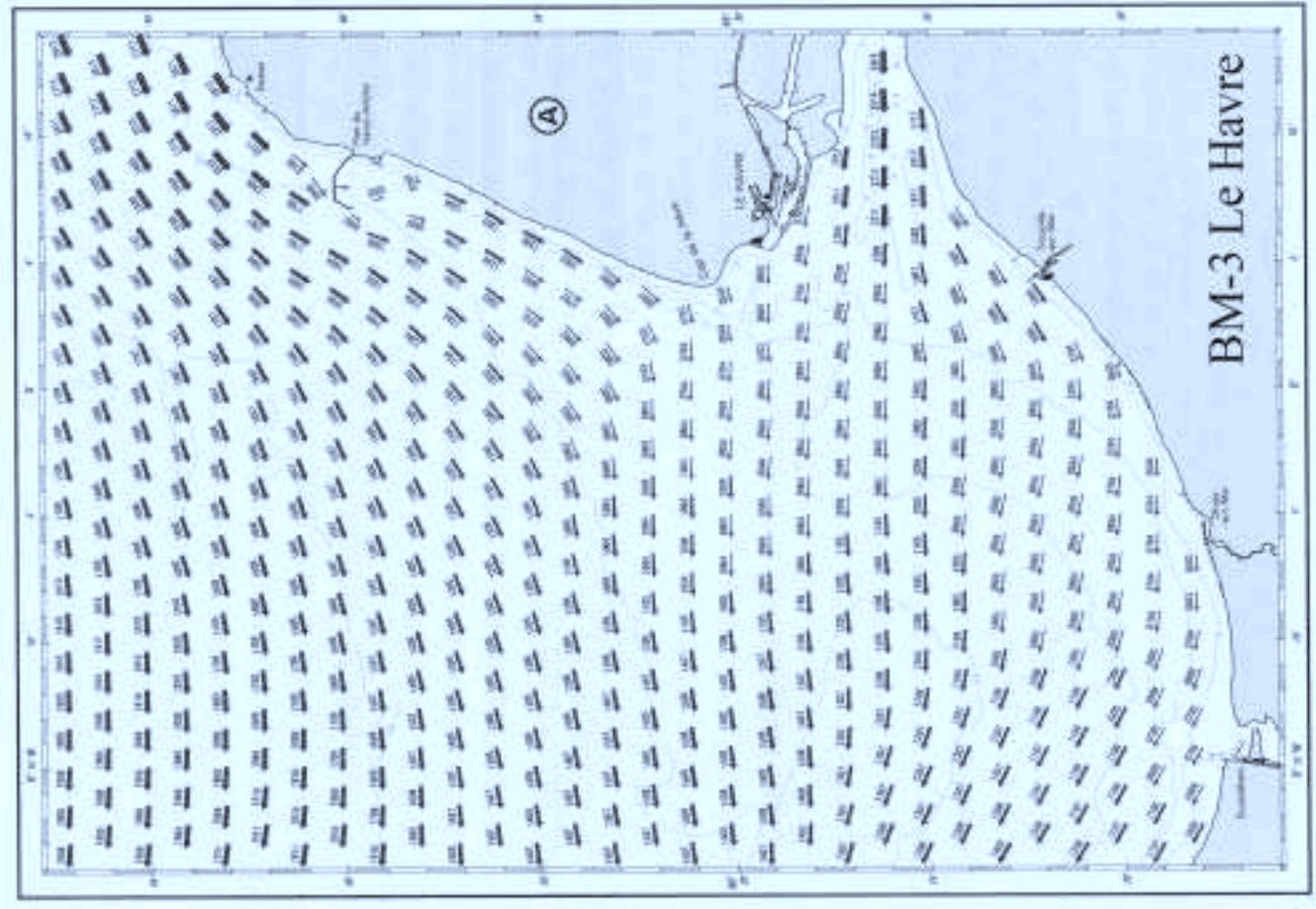
#### Début de flot (BM +1 – BM +2, *fig. I-13c*)

Après un étale de basse-mer très court (~1 heure), le flot génère des courants d'ouest en est en direction de l'estuaire de la Seine, qui se remplit alors. Le long des côtes du pays de Caux, les courants s'orientent progressivement vers le NNE.

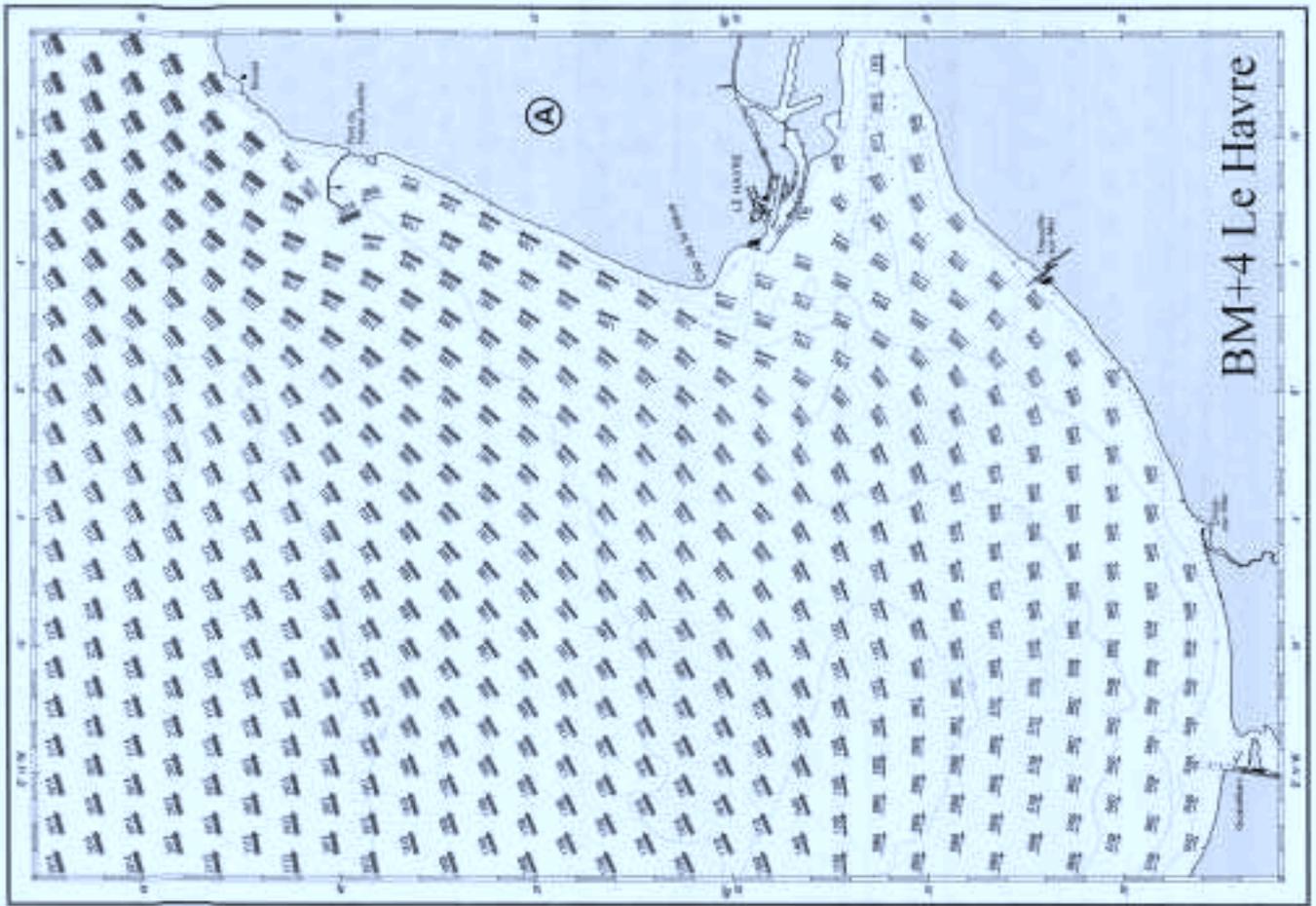
b



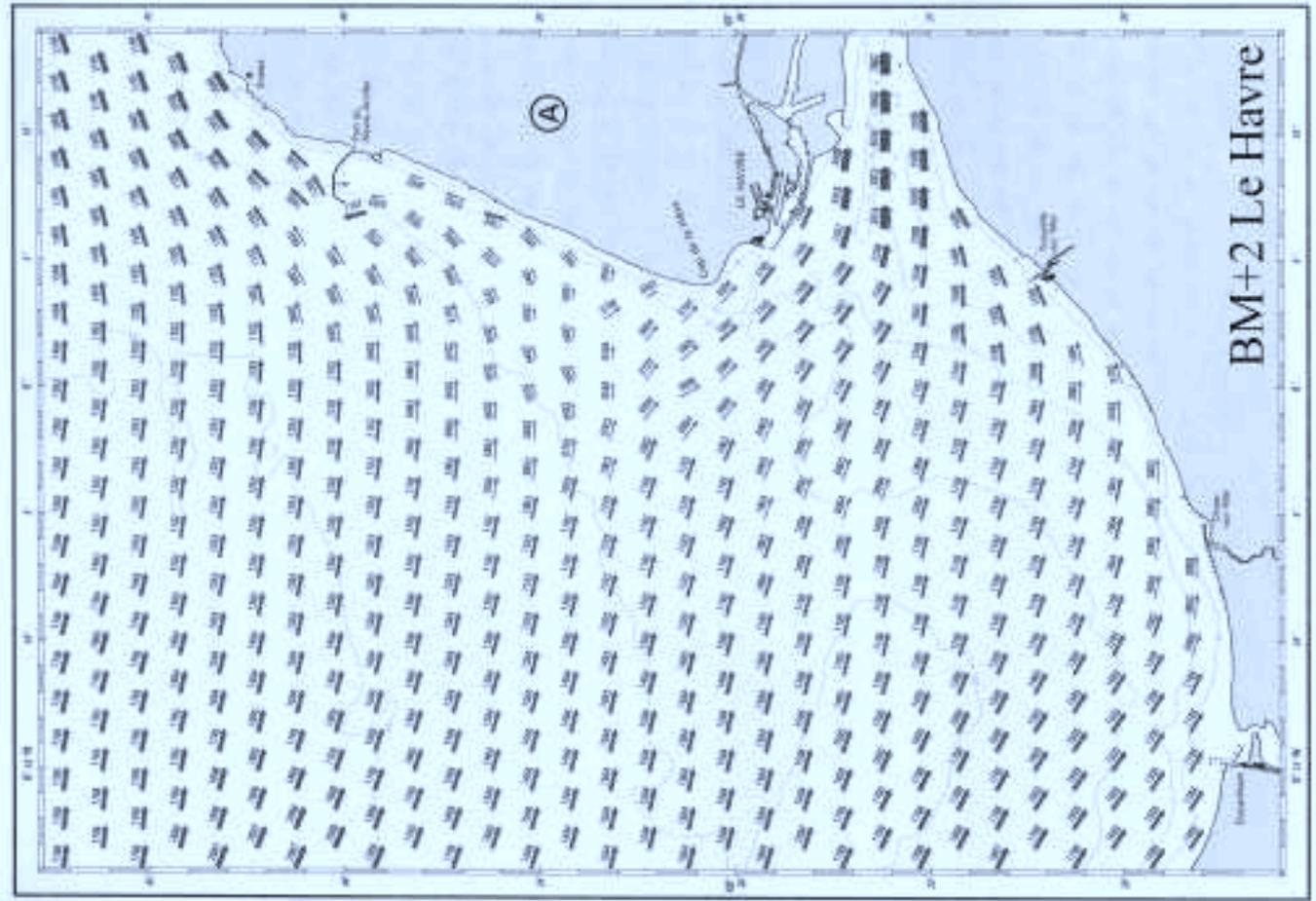
a



d



c



### Fin de flot (BM +3 à BM +5, fig. I-13d)

Au Nord de l'estuaire de la Seine, les courants sont toujours orientés en direction du NNE avec des vitesses importantes pouvant atteindre plus de  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en marée de VE (courant de Verhaule). En effet, l'estuaire de la Seine étant rempli, les courants de marée sont déviés vers le NE. Le long des côtes du Calvados, un courant dirigé vers l'est appelé courant du Calvados apparaît avec des vitesses toutefois plus faibles qu'au Nord de la baie.

## 2.2.2 Apports d'eau douce continentale

### 2.2.2.1 Débits fluviatiles

Les caractéristiques hydrologiques générales de la Seine seront décrites brièvement ici. Les débits feront l'objet d'une analyse développée dans le chapitre III.

Le bassin versant de la Seine est soumis à un régime pluvial océanique modéré avec des périodes hivernales de type continental froid et sec. Depuis 1941, début du suivi régulier journalier du débit de la Seine (Service de la Navigation de la Seine, Port de Rouen), les moyennes annuelles se répartissent dans une large fourchette entre  $195 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  et  $902 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  (fig. I-14). Le débit moyen annuel de la Seine à Poses entre 1941 et 2001 est de  $436 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Compte tenu de la distance qui sépare le lieu de mesure (Poses) et l'embouchure ( $\sim 150 \text{ km}$ ), on estime que les apports d'eau douce réels qui arrivent en Seine sont sous-estimés d'au moins 12 %, les apports latéraux de l'Austreberthe, l'Andelle, la Risle et l'Eure n'étant pas pris en compte (Guézennec, 1999; Le Hir & Silva Jacinto, 2001). Des études en cours (Dupuis *et al.*, 2002) montrent que ces apports fluviaux des bassins versants associés peuvent même atteindre 35% en période d'étiage. Le débit majoré de la Seine est alors estimé à  $480 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  à l'embouchure de la Seine.

Les débits instantanés en étiage varient peu grâce aux différents barrages réalisés le long de la Seine mais ils peuvent cependant encore diminuer en période de sécheresse, comme en août 1992 où le débit a chuté à  $40 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Le débit de la Seine est donc contrôlé par les épisodes de pluies saisonnières à périodicité hivernale. Toutefois, le régime fluvatile est aussi ponctué d'épisodes de très forts débits qui ne sont plus d'occurrence saisonnière mais événementielle. Ces derniers apparaissent après des épisodes pluvieux exceptionnels de très courte durée (pluie torrentielle pendant 8 jours, crue de 1924) ou soutenue sur plusieurs semaines (crue de 1910). Parmi les autres crues exceptionnelles du XX<sup>ème</sup> siècle on peut citer celles de 1910, 1924, 1955, 1970, 1995 et 2001 caractérisées par des débits instantanés dépassant les  $2\,000 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Avant les années 1900, Belleville (*in* Le Floch, 1961) cite le chiffre de  $2\,480 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  pour celle de 1882.

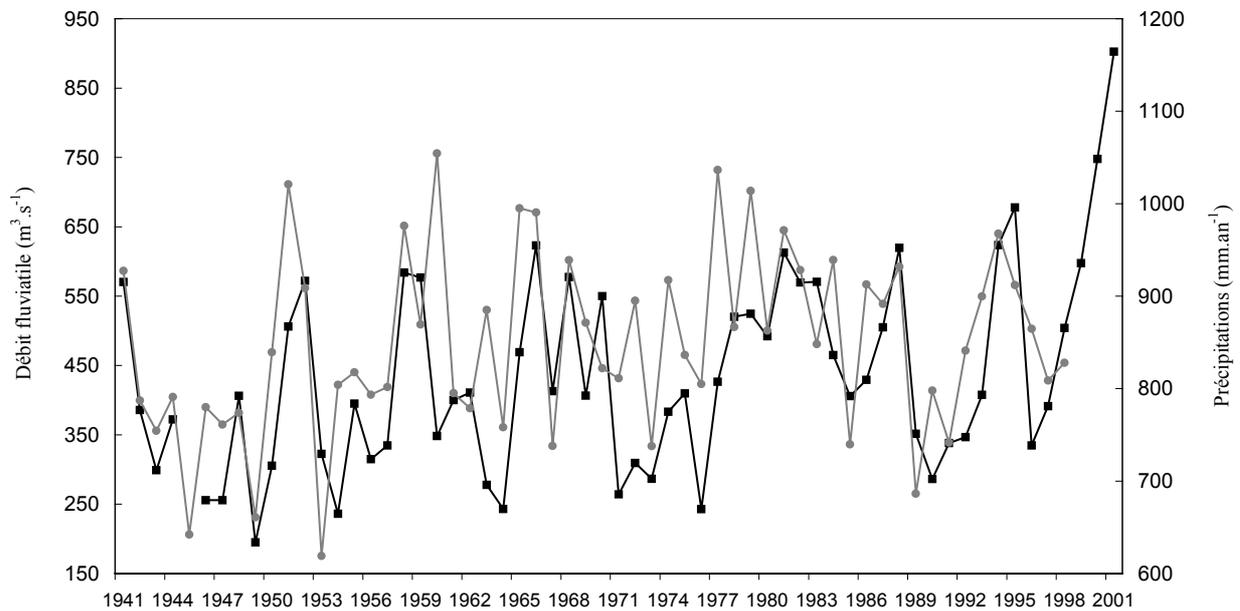


Figure I-14. Corrélation entre le débit moyen annuel de la Seine et les précipitations enregistrées à la même période en France (source des données des précipitations, Mitchell et al., 2002).

Le débit solide de la Seine à Poses (160 km de l'embouchure de la Seine, *fig. In-3, p. 3*) est estimé à partir du débit liquide et des teneurs en matières en suspension (MES) (*fig. I-15*). Les apports solides journaliers sont compris entre quelques centaines de tonnes en étiage et 20 000 à 30 000 tonnes en crue (Avoine, 1994), et évalués entre 600 000 et 700 000 tonnes par an (Lesourd, 2000).

Toutefois, ces valeurs peuvent varier d'un facteur trois d'une année à l'autre (3,5 fois plus d'apports en 1995 par rapport à 1996-1997), en relation avec les très forts débits constatés pendant ces mêmes années.

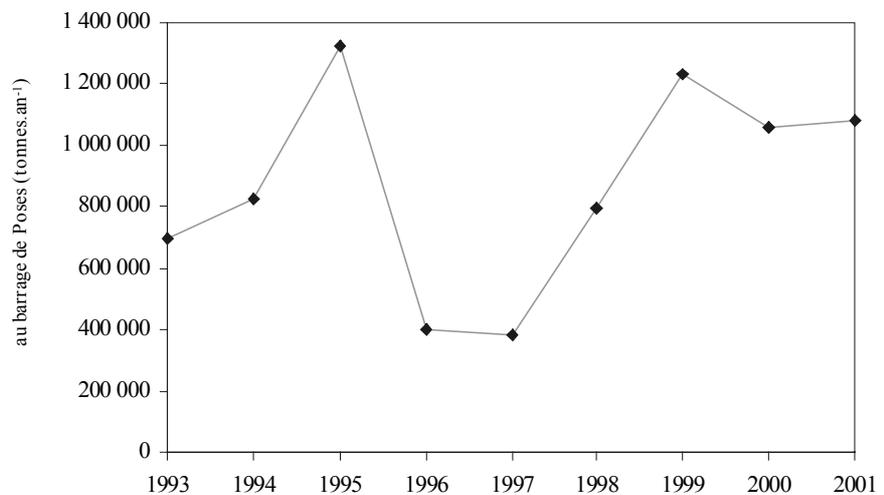
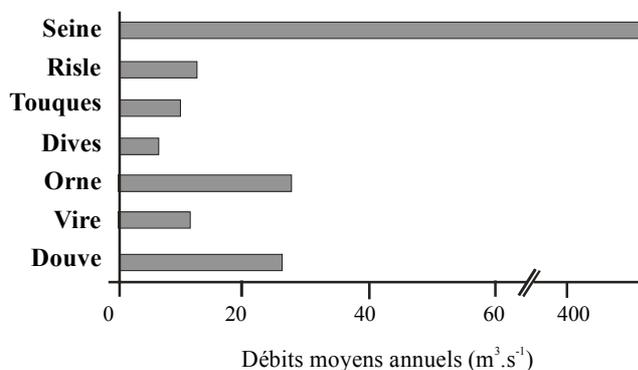


Figure I-15. Apports solides annuels au barrage de Poses entre 1993 et 2001.

### 2.2.2.2 Salinité

La salinité des eaux de la Baie de Seine est inférieure à 35 PSU<sup>1</sup>, c'est à dire plus faible que celle des eaux de l'Atlantique à la même latitude (35,4 PSU en moyenne) (Larsonneur, 1975). En effet, la salinité de la Baie de Seine est largement influencée par l'arrivée des eaux douces fluviales, surtout celles de la Seine. Les rivières (Risle, Touques, Dives, Orne, Vire et Douve) qui débouchent le long du rivage bas-normand apportent également leurs contributions (fig. I-16). Cependant la dilution de ces eaux douces est très rapide dans la plus grande partie de la Baie puisque la limite d'influence des eaux marines (fixée arbitrairement à 0,5 PSU appelée aussi front de salinité) montre une grande homogénéité sur la verticale de la colonne d'eau entre le fond et la surface, différence inférieure à 0,3 PSU (Aminot *et al.*, 1997). C'est la Baie de Seine orientale qui montre les stratifications les plus marquées aussi bien à l'échelle de la marée qu'à l'échelle de la saison. En effet, la répartition verticale et horizontale des isohalines est étroitement liée au débit de la Seine, au coefficient de marée et à l'agitation qui vont favoriser le mélange (tabl. I-5). D'une manière générale, en vives-eaux, la colonne d'eau est bien mélangée et les stratifications sont très faibles aussi bien à BM qu'à HM<sup>2</sup>. En mortes-eaux, les stratifications sont beaucoup plus fortes notamment à BM (Aminot *et al.*, 1997).



**Figure I-16.** Débits moyens annuels des rivières et fleuves débouchant en Baie de Seine.

Limite de l'intrusion saline > 0,5 PSU	Crue	Etiage
Mortes-eaux	12 km	12-14 km
Vives-eaux	26-30 km	23 km
Isohaline 33 PSU	Pour les débits > 1000 m³.s⁻¹, extension dans toute la frange côtière de la Baie de Seine	Pour les débits < 500 m³.s⁻¹, extension en Baie de Seine orientale exclusivement

**Tableau I-5.** Limite de l'intrusion saline selon les conditions de marée et de débit fluviales (d'après Avoine, 1981). Extension du panache "d'eau dessalée" (d'après Aminot *et al.*, 1997).

<sup>1</sup> PSU: Practical Salinity Unit, ou unité pratique de salinité

<sup>2</sup> BM: Basse Mer, HM: Haute Mer

Lors de sa sortie de l'estuaire, l'eau douce de surface, matérialisée par un gradient de salinité compris entre 0,5 et 30 PSU, se répartit en Baie de Seine selon deux directions, l'une vers le N-NO et l'autre en direction des côtes du Calvados (Avoine *et al.*, 1984; Lafite, 1990).

### 2.2.2.3 Bouchon vaseux et panache turbide de la Seine

Dans la plupart des estuaires dominés par la marée, une zone de très forte concentration en matériel particulaire (turbidité  $> 500 \text{ mg.l}^{-1}$ , voire  $> 1 \text{ g.l}^{-1}$  selon l'estuaire) apparaît à proximité de l'embouchure; cette zone est nommée "bouchon vaseux". La dynamique de ce bouchon vaseux, et en particulier celui de la Seine, a fait l'objet de nombreuses études dès les années 1970 (Germaneau, 1969, 1971, 1974) puis au cours du SAUM (Avoine *et al.*, 1981; Avoine, 1981; Larsonneur & Avoine, 1981). Les travaux plus récents du programme Seine-Aval I (Brenon & Le Hir, 1999b; Brenon & Le Hir, 1999a; Lesourd, 2000; Dupont *et al.*, 2001; Le Hir *et al.*, 2001) n'ont pas montré de différence notable en 20 ans, en conditions hydrologiques équivalentes. Les deux principaux facteurs qui contrôlent la dynamique du bouchon vaseux de la Seine sont l'asymétrie de la propagation de la marée et le débit fluvial de la Seine. Le bouchon vaseux est un lieu important de stockage de matériel particulaire estimé entre 20 000 et 400 000 tonnes (Avoine, 1981). Les apports particuliers qui alimentent le bouchon vaseux sont d'origine composite, principalement fluviaux mais d'autres sources comme l'érosion des vasières intertidales sous l'action des houles de tempête peuvent venir alimenter ce stock de MES.

Les apports turbides de l'estuaire de la Seine dans la partie sud-est de la Baie de Seine sont incontestables. Ils sont originaires du bouchon vaseux, expulsé par certaines conditions réunies de marée et de débit fluvial (*fig. I-17*). C'est principalement en période combinée de marée de vives-eaux et à basse mer, et/ou de forts débits fluviaux de la Seine que l'expulsion peut se produire. Avoine (1981) estime qu'à partir d'un régime fluvial de  $550 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , la partie aval du bouchon vaseux sort de l'estuaire de la Seine. Des études récentes menées ont permis de préciser cette expulsion de matériaux fins conditionnée par la durée et l'intensité de la crue hivernale ainsi que par la quantité de MES disponible au sein du bouchon vaseux (Lesourd *et al.*, 2003; Garnaud *et al.*, soumis). Cette disponibilité en matériel fin à l'embouchure de la Seine est directement liée à la chronique de la Seine, c'est à dire aux conditions hydrologiques des années précédentes: des années sèches permettent un stockage de MES et, au contraire, des années humides laissent peu de temps à la reconstitution d'un stock important de MES avant l'hiver suivant.

	Mortes-eaux		Vives-eaux	
	BM	PM	BM	PM
	C'est en période d'étiage que le bouchon vaseux atteint son extension et volume maximum (entre Le Havre et Vieux-Port)			
	<p>Etendue du bouchon vaseux de l'ordre de 10 km seulement</p>	<p>15 km de long entre la digue du Ratier et W de Tancarville</p>	<p>30 km de long (Honfleur à Quillebeuf)</p>	
Crue	C'est en période de crue que le bouchon vaseux est présent à l'embouchure de l'estuaire et, dans certaines conditions, expulsé en Baie de Seine orientale			
	<p>Les vitesses des courants de marée sont plus faibles qu'en vives-eaux. Présence d'un bouchon vaseux bien développé mais moins turbide qu'en vives-eaux, les MES dépassent rarement <math>0,5 \text{ mg.l}^{-1}</math></p>	<p>Expulsion partielle ou totale du bouchon vaseux selon le débit. Dispersion d'une partie des MES vers la Baie de Seine</p>	<p>Entre Honfleur et Tancarville (turbidité <math>&gt; 0,5 \text{ g.l}^{-1}</math>)</p>	

Figure I-17. Position du bouchon vaseux de la Seine en fonction du régime hydrologique de la Seine et des conditions de marée (d'après Avoine, 1981).

Le panache turbide identifié en Baie de Seine résulte de l'expulsion en mer d'une partie du bouchon vaseux stocké dans l'estuaire et l'embouchure de la Seine (*fig. I-18*). En période de crue, l'apport d'eau douce en direction de la baie génère une stratification des eaux: dessalure de la partie supérieure de la tranche d'eau et charge en MES plus élevée en surface qu'au fond (Avoine, 1981). Les valeurs de MES rencontrées au droit de l'embouchure, à une dizaine de kilomètres



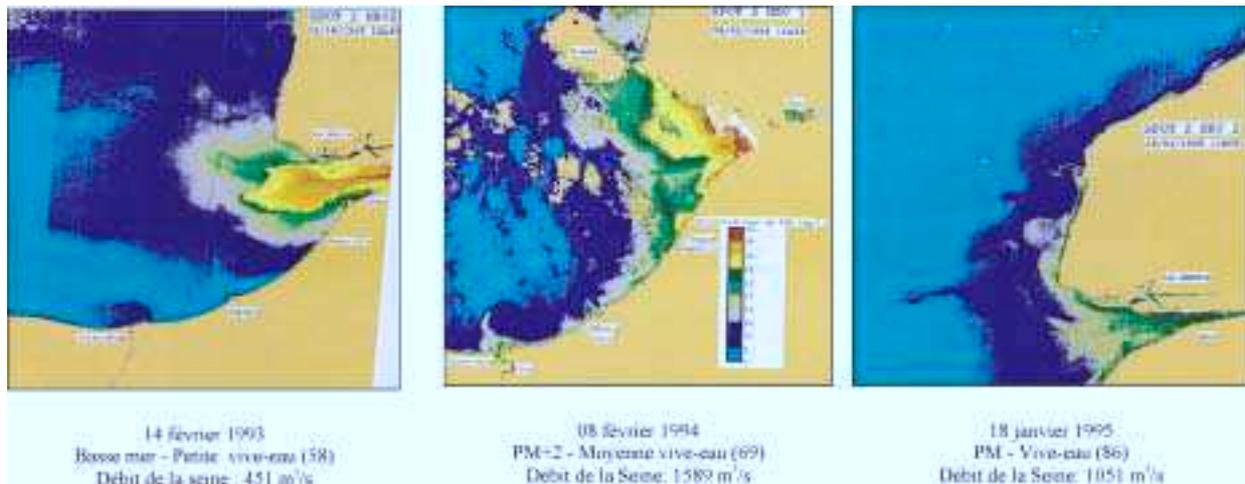
**Figure I-18.** Le panache turbide de la Seine, contraste entre deux masses d'eau (février 2000).

au large du Havre, se situent entre 4 et 8 mg.l<sup>-1</sup> par débit d'étiage (150 à 170 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) et entre 25 à 30 mg.l<sup>-1</sup> par débit élevé (500 à 700 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). Le reste de la Baie de Seine est très peu turbide. Le panache turbide de la Seine est nettement plus étendu en hiver qu'au printemps en raison des volumes expulsés plus importants lors des crues hivernales. Finalement, comme l'expulsion du bouchon vaseux, l'extension du panache turbide de la Seine est maximum en période de crue et à basse mer de marée de vives-eaux.

Le long du littoral du pays de Caux, le panache turbide originaire de l'estuaire de la Seine, avec les concentrations de MES en surface supérieures à 20 mg.l<sup>-1</sup>, se développe sur un kilomètre de largeur, même en absence de houle. En fait, ces eaux dessalées et chargées en MES transitent vers le nord sous forme de lentilles superficielles jusqu'à l'est de Fécamp (Dupont *et al.*, 1991; Brunet *et al.*, 1996; Brylinski *et al.*, 1996; Thiébaud, 1996). Cette circulation côtière de masse d'eau est parfois dénommée "fleuve côtier" (Dupont *et al.*, 1986). Pendant la crue de mars 1982, Avoine (1984) et Lafite (1990) ont montré qu'un transfert des sédiments expulsés par la Seine s'effectuait également vers le domaine sud-oriental de la Baie de Seine, mais les données restent limitées.

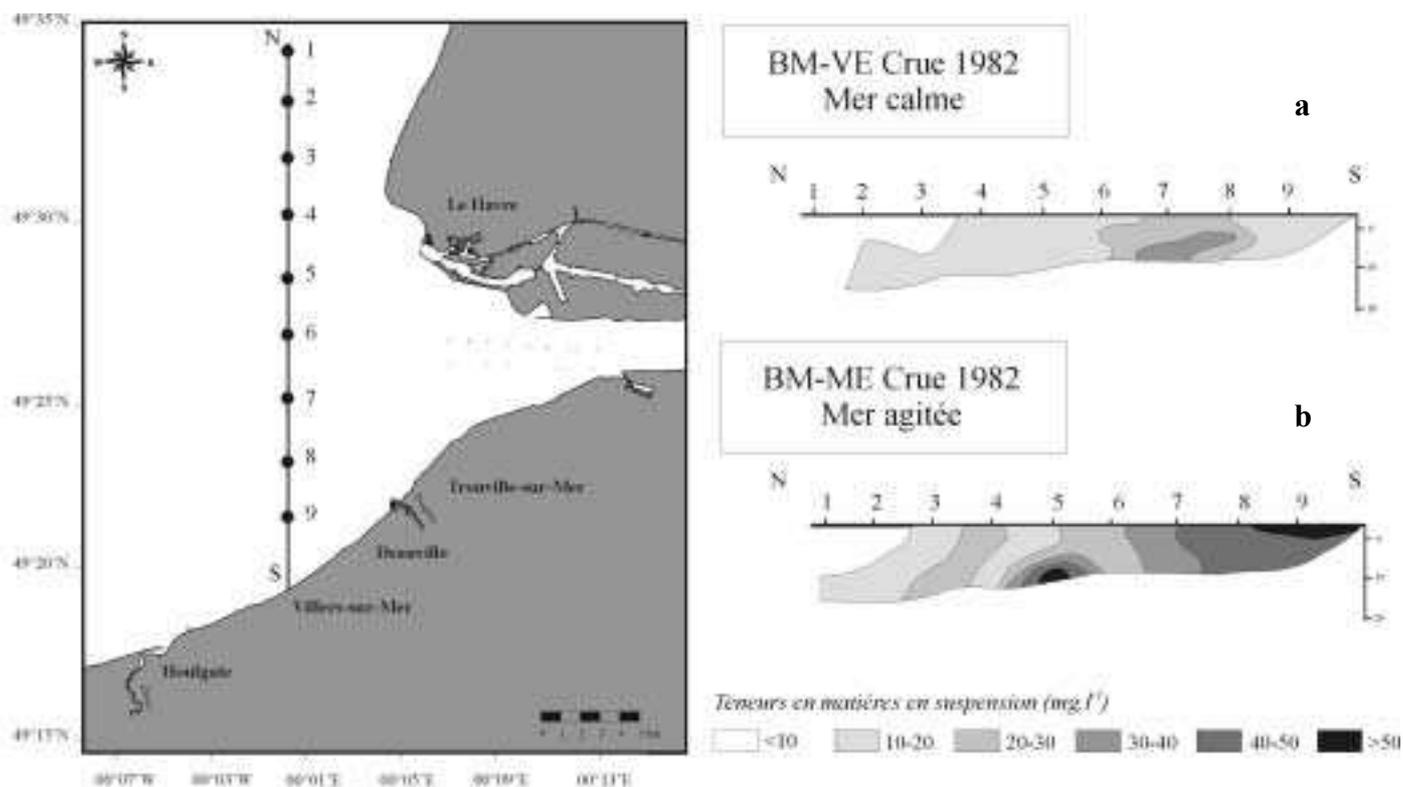
Le devenir des MES de l'estuaire, expulsées par le panache turbide, n'est pas très bien connu. Les photographies aériennes et satellitaires révèlent des directions et extensions différentes liées aux conditions hydrologiques. Mais elles n'apportent que des informations sur les mouvements de surface de la masse d'eau. La déconnexion entre la couche turbide de surface et de fond est possible, particulièrement lors des coups de vent importants entraînant les eaux de surface sur de plus grandes distances. Par exemple, en février 1993, le panache turbide observé en surface est similaire à celui de mars 1979 malgré des débits relativement plus faibles (Dilligeard, 1997). Cette progression du panache a été attribuée à l'association de forts coefficients de marée et d'une tempête. En effet, l'effet du vent peut provoquer en surface (i) une extension forcée du panache, (ii) un changement de direction de l'extension du panache et

(iii) la création de taches turbides. Un autre exemple est celui du 8 février 1994 où les images Spot montrent un panache turbide de la Seine distinctement dirigé vers le nord. A cette époque, un vent du O-SO de 12 nœuds souffle et contraint le panache turbide à se diriger vers le nord (fig. I-19). Des vortex bien visibles à l'embouchure de l'Orne et de la Touques se développent dans ces conditions particulières d'agitation de la mer.



**Figure I-19.** Situation du panache turbide de la Seine par différentes conditions. Vues Spot calibrées par des mesures de concentrations in situ des MES en janvier 1995 (campagne MESAT) et interpolées sur les images antérieures (Dilligeard, 1997). Copyright CNES 1995, distribution Spot-Image.

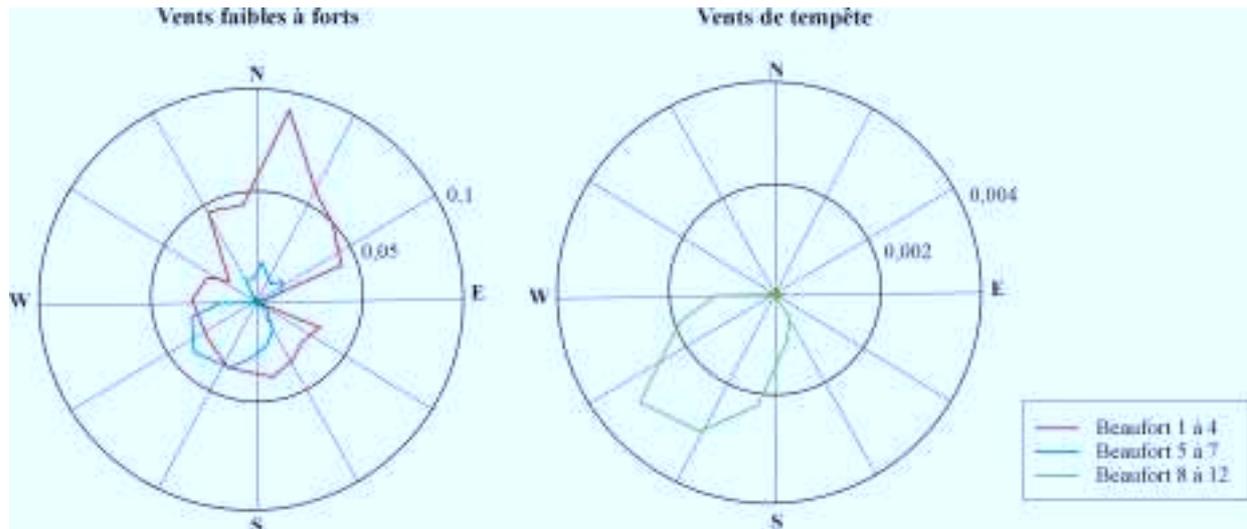
D'une manière générale, les vents générés par les tempêtes peuvent également influencer la distribution de la turbidité sur la totalité de la Baie de Seine. Ainsi, la campagne Thalia 2 de septembre-octobre 1978 a permis de mettre en évidence l'effet d'une tempête sur les niveaux de turbidité dans la baie (Aminot *et al.*, 1997). Après la tempête, un accroissement très net de la turbidité a été remarqué dans toute la baie. Avant cet épisode, très peu de valeurs dépassaient 4 mg.l<sup>-1</sup> alors que des valeurs de 4 à 20 mg.l<sup>-1</sup> étaient fréquentes après octobre 1978 dans les zones peu profondes. Ceci a également été observé dans le secteur oriental. En effet, lors de la campagne de 1982, Avoine *et al.* (1984) ont observé des turbidités importantes en mortes-eaux (fig. I-20b), supérieures à celles enregistrées pendant cette même période de crue en vives-eaux (fig. I-20a). Cette turbidité observée au sein du Parfond et près de la côte du Calvados est en relation directe avec l'agitation de la mer qui remet en suspension sur le fond les fractions fines fraîchement déposées (fig. I-20b).



**Figure I-20.** Profils verticaux NS de la turbidité mesurée en 9 points dans les eaux de la Baie de Seine en période de crue (1982) et par des conditions d'agitation différentes: mer calme (a) et agitée (b) (d'après Avoine et al., 1984).

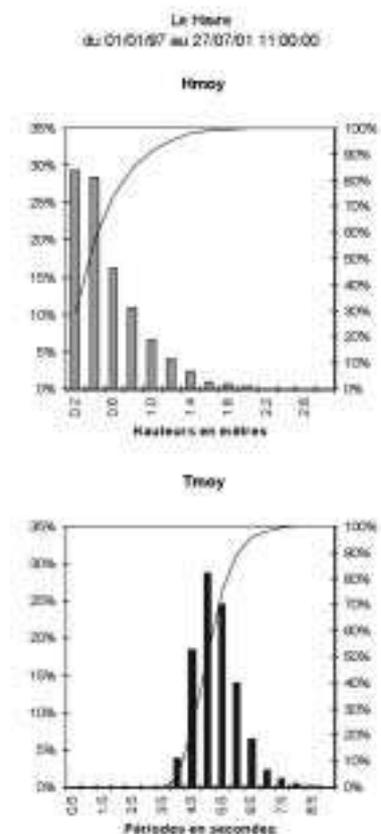
### 2.2.3 Agitation: vent, houle et clapot

Les caractéristiques de l'agitation en Baie de Seine sont basées sur 19 ans d'enregistrements (1976-1995) de données météorologiques à la station du sémaphore du Cap de la Hève (fig. I-21). Les vents prédominants en Baie de Seine orientale sont des secteurs N et NE et ont une intensité comprise entre 2,5 et 6 m.s<sup>-1</sup> (60% des cas). Par contre, lors des tempêtes, les vents sont nettement de secteur SW et peuvent atteindre 17 m.s<sup>-1</sup> (0,3 % des cas dans l'année, force 8). La Baie de Seine orientale est soumise à un régime de vents d'intensité assez élevée puisque les vents de force supérieure à 10 m.s<sup>-1</sup> ont une fréquence d'occurrence de 10% (Le Hir & Silva Jacinto, 2001). Toutefois, toutes ces données concernent l'agitation mesurée et observée dans le chenal du Havre, au large et à proximité des ouvrages portuaires en construction. Elles sont donc difficilement extrapolables à la Baie de Seine sud-orientale.



**Figure I-21.** Rose des vents au Cap de la Hève selon leur intensité sur l'échelle de Beaufort. Probabilité entre 0 et 1. Pour des très faibles brises à jolies brises (1 à 4 Beaufort), ce sont des vents de N-NE et dans une moindre mesure SW qui sont les plus fréquents. Pour les vents les plus forts (5 à 7 Beaufort), la probabilité de l'occurrence est nettement plus importante autour du secteur SW. Pour les vents de tempête (8 et plus), dessin de droite, la provenance du vent reste toujours comprise entre les secteurs Sud et Ouest (Le Hir & Silva Jacinto, 2001).

Encastrée entre le Cotentin et le Pays de Caux, la Baie de Seine est abritée des longues houles océaniques du large. Par contre, elle est soumise aux courtes houles<sup>3</sup> générées par les vents locaux qui soufflent principalement dans les secteurs NW-NE (Larsonneur, 1974). Leurs amplitudes moyennes sont de l'ordre d'1,5 m et de courte période, 4 à 5 s, en raison d'un fetch limité à la Baie de Seine (fig. I-22). Les périodes plus longues (~ 6-8 s) sont la signature des houles résiduelles du large. En Baie de Seine, les statistiques sur l'agitation de la mer montrent que la mer est peu agitée à agitée (0,5 à 2,5 m de hauteur des vagues) pendant 20% de l'année. La hauteur moyenne des vagues de tempête est de 5 m au large du Parfond (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1984) mais celles-ci restent exceptionnelles, seules 5% des vagues dépassent plus de 2,2 m.



**Figure I-22.** Histogrammes de la hauteur moyenne et de la période des vagues entre 1997 et 2001. (données recueillies sur le site du CETMEF: <http://www.equipement.gouv.fr/cetmef/candhis>).

<sup>3</sup> appelée aussi mer de vent ou clapot pour des vagues de très courte période.

L'énergie de cette agitation importante provenant des secteurs ouest atteint les fonds inférieurs à 10 m et joue un rôle notable dans la dynamique des sédiments fins en Baie de Seine orientale. En effet, par faible profondeur d'eau, ces mouvements de va-et-vient de l'eau génèrent sur le fond des contraintes de pression et de cisaillement susceptibles de remettre en suspension des sables fins et des vases, qui sont ensuite transportés par les courants de marée.

## Bibliographie du chapitre I

- Alduc, A. & Auffret, J.P.** (1979). Carte bathymétrique du bed-rock de la manche orientale. *Bulletin de la Société Limnéenne de Normandie* 107, 99.
- Allen, J.R.L.** (1993). An introduction to estuarine lithosomes and their controls. *Sedimentology review* 1, 123-138.
- Allison, M.A., Nittrouer, C.A. & Faria, L.E.C.** (1995). Rates and mechanisms of shoreface progradation and retreat downdrift of the Amazon river mouth. *Marine Geology* 125, 373-392.
- Allison, M.A., Nittrouer, C.A., Faria, L.E.C., Silveira, O.M. & Mendes, A.C.** (1996). Sources and sinks of sediment to the Amazon margin: the Amapa coast. *Geo-Marine Letters* 16, 36-40.
- Allison, M.A. & Nittrouer, C.A.** (1998). Identifying accretionary mud shorefaces in the geologic record: insights from the modern Amazon dispersal system. In: Schieber, J., Zimmerle, W. & Sethi, P.S. (Editors). *Shales and Mudstones*. Schweizerbart Verlag, Stuttgart, 147-161.
- Aloisi, J.-C., Auffret, G.A., Auffret, J.-P., Barusseau, J.P., Hommeril, P., Larsonneur, C. & Monaco, A.** (1977). Essai de modélisation de la sédimentation actuelle sur les plateaux continentaux français. *Bulletin de la Société Géologique de France* 7 (2), 183-195.
- Aminot, A., Guillaud, J.-F. & Kérouel, R.** (1997). La Baie de Seine: hydrologie, nutriments et chlorophylle (1978-1994). Repère Océan, 14. *IFREMER*, Brest, 148 p.
- Auffret, J.P. & Larsonneur, C.** (1975). Le modèle sédimentaire de la Manche orientale. *XI<sup>me</sup> Congrès International de Sédimentologie*, Nice, 33-39.
- Auffret, J.-P. & Larsonneur, C.** (1977). Paléovallées et bancs sableux entre l'estuaire de la Seine et le Nord-Cotentin. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 21-33.
- Auffret, J.-P., Alduc, D., Larsonneur, C. & Smith, A.J.** (1980). Cartographie du réseau des paléovallées et de l'épaisseur des formations superficielles meubles de la Manche orientale. *Annales de l'Institut Océanographique* 56, 21-35.
- Auffret, J.-P. & d'Ozouville, L.** (1986). Apports de l'imagerie fournie par le sonar à balayage latéral à la connaissance de la dynamique sédimentaire en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 201-209.
- Avoine, J.** (1981). L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 236 p.
- Avoine, J.** (1994). Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. *Rapport d'étude, IFREMER - Port autonome du Havre*, Brest, 153 p.
- Avoine, J., Allen, J.P., Nichols, M., Salomon, J.C. & Larsonneur, C.** (1981). Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France: effect of man-made modification on estuary-shelf sedimentology. *Marine Geology* 40, 119-137.
- Avoine, J., Crevel, L., Dubrulle, L., Boust, D. & Guegeniat, P.** (1984). Sédiments et dynamique sédimentaire en Baie de Seine. *XVIII<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique*. Société Hydrotechnique de France, Marseille, I.3.1-I.3.8.
- Barusseau, J.P. & Long, B.** (1976). Ambiguïté de la notion de sables actuels et reliques: exemple de la côte nord-ouest de l'île de Ré. *Annales hydrographiques* 4 (1), 75-81.
- Berné, S.** (2002). Evolution of sand banks. *Comptes Rendus Geoscience* 334, 731-732.
- Berné, S., Auffret, J.-P. & Walker, P.** (1988). Internal structure of subtidal sandwaves revealed by high-resolution seismic reflection. *Sedimentology* 35, 5-20.
- Berné, S., Allen, G., Auffret, J.-P., Chamley, H., Durand, J. & Weber, O.** (1989). Essai de synthèse sur les dunes hydrauliques géantes tidales actuelles. *Bulletin de la Société Géologique de France* 8 (6), 1145-1160.
- Boldrin, A., Bortoluzzi, G., Frascari, F., Guerzoni, S. & Rabitti, S.** (1988). Recent deposits and suspended sediments off the Po delta Pila (Po River, main mouth Italy). *Marine Geology* 79, 159-170.
- Bouchet, J.-M.** (1987). Distribution estivale des pélites dans les sédiments superficiels de la plateforme sud-gascogne. *Colloque International d'Océanologie*. CIESM, Perpignan, 21-22.

- Bourcart, J.** (1939). Sur les vasières des estuaires de la Manche. *Comptes rendus sommaire des séances de la société géologique de France*, 6, 73-74.
- Bourcart, J. & Francis-Boeuf, C.** (1942). La vase. *Sédiments et sédimentation*, Herman & C<sup>ie</sup>, Paris, 67 p.
- Brenon, I. & Le Hir, P.** (1999a). Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): identification of formation processes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49, 525-544.
- Brenon, I. & Le Hir, P.** (1999b). Simulation de bouchon vaseux dans l'estuaire de la Seine: capacité et limites d'un modèle bidimensionnel horizontal. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris* 328 (Série2a), 327-332.
- Brunet, C., Brylinski, J.M., Bodineau, L., Thoumelin, G., Bentley, D. & Hilde, D.** (1996). Phytoplankton dynamics during the spring bloom in the south-eastern English Channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 43, 469-483.
- Brylinski, J.M., Brunet, C., Bentley, D., Thoumelin, G. & Hilde, D.** (1996). Hydrography and phytoplankton biomass in the eastern English Channel in spring 1992. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 43, 507-519.
- Castaing, P.** (1981). Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes. Cas de la Gironde. *Thèse d'état, Université de Bordeaux I*, 530 p.
- Chabert d'Hières, G. & Le Provost, C.** (1978). Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. *Annales hydrographiques* 46, 5-35.
- Chavez, P.S., Isbrecht, J., Galanis, P., Gabel, G.L., Sides, S.C., Soltesz, D.L., Ross, S.L. & Velasco, M.G.** (2002). Processing, mosaicking and management of the Monterey Bay digital sidescan-sonar images. *Marine Geology* 181, 305-315.
- Chiffolleau, J.-F.** (2001). La contamination métallique. Programme Scientifique Seine-Aval, 8. *IFREMER*, 41 p.
- Chiffolleau, J.-F., Gonzalez, J.-L., Miramand, P. & Thouvenin, B.** (1999). Le cadmium. Comportement d'un contaminant métallique en estuaire. Programme Scientifique Seine-Aval, 10. *IFREMER*, 31 p.
- Cirac, P., Berné, S., Castaing, P. & Weber, O.** (2000). Processus de mise en place et d'évolution de la couverture sédimentaire superficielle de la plate-forme nord-aquitaine. *Oceanologica Acta* 23 (6), 663-686.
- Clet-Pellerin, M., Huault, M.-F., Larsonneur, C. & Pellerin, J.** (1976). La basse vallée de l'Orne: le remblaiement périglaciaire et postglaciaire, l'évolution paléogéographique et l'histoire de la végétation. *Bulletin de la Société Limnène de Normandie* 105, 23-44.
- Clet-Pellerin, M., Dupeuble, P.-A., Helliun, M., Lefebvre, D., Pellerin, J., Brebion, P., Lauriat-Rage, A., Laudridou, J.-P. & Rioult, M.** (1987). Les formations marines et continentales du Pléistocène récent dans la région d'Asnelles-Saint-Côme-de-Fresné (Calvados). *Bulletin du Centre de Géomorphologie du CNRS* 32, 71-98.
- Coleman, J.M., Roberts, H.H. & Stone, G.W.** (1998). Mississippi river delta: an overview. *Journal of Coastal Research* 14 (3), 698-716.
- Crevel, L.** (1983). Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la Baie de Seine. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 186 p.
- Curray, J.R.** (1973). Equilibrium, relict, palimpsest and pseudo equilibrium shelf sediments. *Symposium international sur les relations entre estuaires et plateaux continentaux*. Livre des résumés, Bordeaux, 28.
- Cyprien, A.-L. & Visset, L.** (2002). Chronologie de l'interaction de l'homme et du milieu dans l'espace central et aval de la Loire (Ouest de la France). *GEMINA*, Nantes, 183 p.
- Davies, A.M. & Xing, J.** (2002). Processes influencing suspended sediment movement on the Malin-Hebrides shelf. *Continental Shelf Research* 22, 2081-2113.
- DeMaster, J.D., McKee, B.A., Nittrouer, C.A., Jiangchu, Q. & Guodong, C.** (1985). Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea. *Continental Shelf Research* 4 (1/2), 143-158.
- Dias, J.R.A. & Nittrouer, C.A.** (1984). Continental shelf sediments of northern Portugal. *Continental Shelf Research* 3 (2), 147-165.
- Dilligeard, E.** (1997). Télédétection des eaux de cas II - Caractérisation des sédiments marins. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université du Littoral, Côte d'Opale*, 184 p.

- Drake, D.E.** (1976). Suspended sediment transport and mud deposition on continental shelves. In: Stanley, D.J. & Swift, D.J.P. (Editors), Marine sediment transport and environmental management. *John Wiley & Sons*, New York, 127-158.
- Drake, D.E. & Cacchione, R.W.** (1985). Seasonal variation in sediment transport on the Russian River shelf, California. *Continental Shelf Research* 4, 495-514.
- Dubrulle, L.** (1982). Etude hydrosédimentaire de l'estuaire de l'Orne et de ses abords. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle*, Université de Caen, 212 p.
- Dubrulle, L. & Larsonneur, C.** (1984). Dynamique sédimentaire de l'estuaire de l'Orne. *XVIII<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique*. Société Hydrotechnique de France, Marseille, I.6.1-I.6.6.
- Dupont, J.-P., Lafite, R. & Lamboy, M.** (1986). Contribution de l'étude des suspensions à la compréhension des mécanismes hydrosédimentaires estuariens et littoraux en Manche centrale et orientale. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 145-153.
- Dupont, J.-P., Lafite, R., Huault, M.-F., Dupeuble, P.-A., Brylinski, J.-M., Guéguénat, P., Lamboy, M. & Cabioch, L.** (1991). La dynamique des masses d'eaux et des remises en suspension en Manche orientale. *Oceanologica Acta* 11, 177-186.
- Dupont, J.-P., Guézennec, L., Lafite, R., Le Hir, P. & Lesueur, P.** (2001). Matériaux fins. Le cheminement des particules en suspension. Programme scientifique Seine-Aval, 4. *IFREMER*, 40 p.
- Dupuis, E., Laignel, B., Dupont, J.-P., Guézennec, L., Ferlin, P., Galard, Y. & Glémarec, I.** (2002). Apports fluviaux latéraux à l'estuaire de la Seine: synthèse des données disponibles et apports des mesures en continu. *Séminaire de travail Seine-Aval II, 2 & 3 octobre 2002*, 45.
- Ehrhold, A.** (1992). Etude des sédiments superficiels dans la Baie de Seine occidentale. *Mémoire de maîtrise*, Université de Caen, 41 p.
- Ehrhold, A.** (1993). Cartographie et dynamique des sédiments meubles de la Baie de Seine occidentale. *Mémoire de DEA*, 95 p.
- Ehrhold, A., Blanchart, M., Auffret, J.-P. & Garlan, T.** (1998). Conséquence de la prolifération de la crépidule (*Crepidula fornicata*) sur l'évolution sédimentaire de la baie du Mont-Saint-Michel (Manche, France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences IIA* (327), 583-588.
- Ehrhold, A. & Auffret, J.-P.** (2002). Carte sédimentologique des abords du Havre et d'Antifer (embouchure de la Seine, de Ouistreham au Cap d'Antifer).
- Eisma, D.** (1968). Composition, origin and distribution of Dutch coast sands between Hoek van holland and the Island of Vlieland (Netherlands). *Journal of Sea Research* 4, 123-267.
- Eisma, D.** (1981). Supply and deposition of suspended matter in the North Sea. *Special Publication of the International Association of Sedimentologists* 5, 415-428.
- Eisma, D.** (1992). Suspended matter in the aquatic environment. *Springer-Verlag*, Berlin, 315 p.
- Eisma, D. & Kalf, J.** (1987). Dispersal, concentration and deposition of suspended matter in the North Sea. *Journal of the Geological Society, London* 144, 1987.
- Emery, K.O.** (1968). Relict sediments on continental shelves of the world. *Bulletin American Association of Petroleum Geologists* 52, 445-464.
- Emery, K.O.** (1969). The continental shelves. *Scientific American (The ocean)*, 106-122.
- Emery, K.O. & Uchupi, E.** (1984). The geology of the Atlantic ocean. *Springer-Verlag*, Berlin, 1050 p.
- Fairbanks, R.G.** (1989). A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature* 342, 637-642.
- Galloway, W.E. & Hobday, D.K.** (1983). Terrigenous clastic depositional systems. *Springer-Verlag*, Berlin, 423 p.
- Garnaud, S.** (2002). Carte sédimentologique de la Pointe du Cou à la Pointe de Chassiron (Pertuis Breton et Charentais) 7404G. SHOM.
- Garnaud, S., Lesueur, P., Lesourd, S., Garlan, T., Clet, M. & Brun-Cottan, J.-C.** (soumis). Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner shelf (eastern Bay of the Seine, France). *Marine Geology*.

- Garnaud, S., Lesueur, P., Lesourd, S., Poupinet, N. & Brun-Cottan, J.-C.** (2002). Caractérisation des variations lithologiques saisonnières des sédiments de la Baie de Seine orientale; impact des crues de la Seine (France). *Comptes Rendus Geoscience* 334, 323-330.
- Germaneau, J.** (1969). Etude de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine. Origine, déplacement et dépôt des suspensions. *Travaux de Recherche et d'Etude Océanographique*, IX (1-4), 1-100.
- Germaneau, J.** (1971). Sédiments actuels et sédiments fossiles dans la Seine maritime et dans la Seine fluviale. *Travaux de Recherche et d'Etude Océanographique*, XI (1-4), 55-110.
- Germaneau, J.** (1974). Etude de la sédimentation dans la Seine et dans son estuaire. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle*, Université de Bordeaux, 84 p.
- Geyer, W.R., Beardsley, R.C., Candela, J., Castro, B.M., Legeckis, R.V., Lentz, S.J., Limeburner, R., Miranda, L.B. & Trowbridge, J.H.** (1991). The physical oceanography of the Amazon outflow. *Oceanography* 4, 8-14.
- Geyer, W.R., Hill, P., Milligan, T. & Traykovski, P.** (2000). The structure of the Eel River plume during floods. *Continental Shelf Research* 20, 2067-2093.
- Geyer, W.R., Hill, P.S. & Kineke, G.C.** (2003). The transport and dispersal of sediment by buoyant coastal flows. *Continental Shelf Research*, sous presse.
- Goff, J.A., Wheatcroft, R.A.b., Lee, H., Drake, D.E., Swift Donald, J.P. & Fan, S.** (2002). Spatial variability of shelf sediments in the STRATAFORM natural laboratory, Northern California. *Continental Shelf Research* 22, 1199-1223.
- Gorsline, D.S.** (1984). A review of fine-grained sediment origins, characteristics, transport and deposition. In: Stow, D.A.V. & Piper, D.J.W. (Editors). *Fine-grained sediments: deepwater processes and facies*. Special publication of the Geological Society of London, 17-29.
- Gouleau, D.** (1968). Etude hydrologique et sédimentologique de la baie de Bourgneuf. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle*, Université de Caen, 187 p.
- Gouleau, D.** (1971a). Le régime hydrodynamique de la Baie de Bourgneuf et ses conséquences sur la sédimentation. *Cahiers Océanographiques* 7, 629-647.
- Gouleau, D.** (1971b). Le remplissage sédimentaire de la baie de Bourgneuf. *Bulletin du BRGM* IV (2), 23-32.
- Guézennec, L.** (1999). Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal: l'exemple de l'estuaire de la Seine (France). *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle*, Université de Rouen, 240 p.
- Harden, S.L., DeMaster, D.J. & Nittrouer, C.A.** (1992). Developing geochronologies for high-latitude continental shelf deposits: a radiochemical approach. *Marine Geology* 103, 69-98.
- Harris, P.T., Baker, E.K., Cole, A.R. & Short, S.A.** (1993). A preliminary study of sedimentation in the tidally dominated Fly River delta, Gulf of Papua. *Continental Shelf Research* 13, 441-472.
- Kineke, G.C., Sternberg, R.W., Cacchione, D.A., Kranck, K. & Drake, D.E.** (1991). Distribution and characteristics of suspended sediment on the Amazon shelf. *Oceanography* 4 (21), 21-26.
- Kuehl, S.A., Nittrouer, C.A. & DeMaster, D.J.** (1982). Modern sediment accumulation and strata formation on the Amazon continental shelf. *Marine Geology* 49, 279-300.
- Kuehl, S.A., Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J. & Curtin, T.B.** (1984-1985). An overview of sedimentation on the Amazon continental shelf. *Geo-Marine Letters* 4, 207-210.
- Kuehl, S.A., DeMaster, D.J. & Nittrouer, C.A.** (1986a). Nature of sediment accumulation on the Amazon continental shelf. *Continental Shelf Research* 6 (1/2), 209-225.
- Kuehl, S.A., Nittrouer, C.A. & DeMaster, D.J.** (1986b). Distribution of sedimentary structures in the Amazon subaqueous delta. *Continental Shelf Research* 6 (1/2), 311-336.
- Kuehl, S.A., Nittrouer, C.A., Allison, M.A., Faria, L.E.C., Dukat, D.A., Jaeger, J.M., Pacioni, T.D., Figueiredo, A.G. & Underkoffler, E.C.** (1996). Sediment deposition, accumulation, and seabed dynamics in an energetic, fine-grained coastal environment. *Continental Shelf Research* 16 (5/6), 787-815.
- Laboratoire Central d'Hydraulique de France** (1984). Catalogue sédimentologique des côtes françaises - Côtes de la Mer du Nord et de la Manche à la frontière belge, 1606. *Eyrolles*, 408 p.

- Lafite, R.** (1990). Caractérisation et dynamique des particules en suspension dans un domaine marin macrotidal influencé par un estuaire: l'exemple de la Baie de Seine orientale (France). *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Rouen*, 294 p.
- Lafite, R.** (2000). Impact de la dynamique tidale sur les transferts des sédiments fins. *Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches*, Université de Caen, 80 p.
- Larsonneur, C.** (1969). Etude de la partie occidentale de la Baie de Seine. *Cahiers Océanographiques XXI* (5), 439-468.
- Larsonneur, C.** (1971). Manche centrale et Baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles, *Thèse d'Etat de l'Université de Caen*, 394 p.
- Larsonneur, C.** (1972). Le modèle sédimentaire de la Baie de Seine à la Manche centrale dans son cadre géographique et historique. *Mémoire du B.R.G.M.* 79, 241-255.
- Larsonneur, C.** (1974). Données scientifiques générales sur le littoral de la Baie de Seine, compléments sur l'hydrologie de la Baie de Seine. *Centre d'expression thématique et d'expérimentation sur l'environnement du site marin de la Baie de Seine*, 27-38 p.
- Larsonneur, C.** (1975). Sur l'hydrologie de la Baie de Seine. *CETEEM (Centre d'Expression Thématique et d'Expérimentation sur l'Environnement du site Marine de la Baie de Seine)*, Ouistreham, 27-38 p.
- Larsonneur, C.** (1977). De la Baie de Seine à l'estuaire de la Seine, histoire du Quaternaire marin. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre LXIV* (4), 9-19.
- Larsonneur, C. & Hommeril, P.** (1967). Sédiments et sédimentation dans la partie orientale de la Baie de Seine. *Extrait de la revue des sociétés savantes de Hautes-Normandie* 47, 45-75.
- Larsonneur, C. & Avoine, J.** (1981). Détermination des flux de matières en suspension en Baie de Seine. Contrat IFREMER 81/6559. *Contrat IFREMER 81/6559, Laboratoire de géologie marine, Université de Caen*, 45 p.
- Larsonneur, C., Bouysse, P. & Auffret, J.-P.** (1982). The superficial sediments of the English Channel and its Western Approaches. *Sedimentology* 29, 851-864.
- Lautridou, J.-P., Pellerin, J. & Clet-Pellerin, M.** (1987). Les formations marines et continentales d'Asnelles-Saint-Côme-de-Fresné. *Association Française pour l'étude du Quaternaire, excursion du 28 au 31 mai 1987 "La normandie"*, 161-170.
- Laudridou, J.P., Auffret, J.P., Baltzer, A., Clet, M., Lecolle, F., Lefebvre, D., Lericolais, G., Roblin-Jouve, A., Balescu, S., Carpentier, G., Occhietti, S. & Rousseau, D.D.** (1999). Le fleuve Seine, le fleuve Manche. *Bulletin de la Société Géologique de France* 170 (4), 545-558.
- Le Floch, J.-F.** (1961). Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine et en Seine-Maritime, *Thèse d'Etat de la Faculté des sciences de l'Université de Paris*, 494 p.
- Le Hir, P.** (1980). Calcul par modélisation numérique de la structure verticale des courants et application à la Baie de Seine. *Thèse d'ingénieur, Université de Brest*, 122 p.
- Le Hir, P. & L'Yavanc, J.** (1985). Observations de courant en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 25-33.
- Le Hir, P., Salomon, J.C., Le Provost, C., Chabert d'Hiere, G. & Mauvais, J.L.** (1985). Approche de la circulation résiduelle en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 63-71.
- Le Hir, P. & Silva Jacinto, R.** (2001). Courants, vagues et marées: les mouvements de l'eau. Programme Scientifique Seine-Aval, 2. *IFREMER*, 31 p.
- Le Hir, P., Ficht, A., Silva Jacinto, R., Lesueur, P., Dupont, J.-P., Lafite, R., Brenon, I., Thouvenin, B. & Cugier, P.** (2001). Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine estuary (France). *Estuaries* 24 (6B), 950-963.
- Le Provost, C., Fornerino, M. & Villaret, C.** (1986). Sur l'hydrodynamique de la Baie de Seine. Résultats d'observations et de modélisations. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 43-48.
- Lefebvre, D.** (1977). Les alluvions holocènes de basse-Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre LXIV* (4), 73-74.

- Lefebvre, D., Huault, M.-F., Guyader, J., Giresse, P., Hommeril, P. & Larsonneur, C.** (1974). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine: synthèse sédimentologique, stratigraphique et paléogéographique. *Bulletin d'Information Géologique du Bassin de Paris* 39, 27-36.
- Leroyer, C.** (1997). Homme, climat, végétation au Tardi-et Postglaciaire dans le Bassin Parisien: apports de l'étude palynologique des fonds de vallée. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne*, 574 p.
- Lesourd, S.** (2000). Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal: zoom temporel du siècle à l'heure; application à l'estuaire de la Seine. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 280 p.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Auffret, J.P., Poupinet, N. & Laignel, B.** (2001). Morphosedimentary evolution of a macrotidal estuary subjected to human impact; the example of the Seine (France). *Estuaries* 24 (6B), 940-949.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Garnaud, S. & Poupinet, N.** (2003). Seasonal variations in the characteristics of superficial sediments in a macrotidal estuary (the Seine inlet, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56, 1-14.
- Lesueur** (2001). Livret I: Dynamique et archivage des flux continentaux de particules fines dans le domaine côtier: exemples de modèles actuels. *Université de Caen, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches*, 149 p.
- Lesueur, P., Tastet, J.-P. & Marambat, L.** (1996). Shelf mud fields formation within historical times: examples from offshore the Gironde estuary, France. *Continental Shelf Research* 16 (4), 1849-1870.
- Lesueur, P. & Lesourd, S.** (1999). Sables, chenaux, vasières. Dynamique des sédiments et évolution morphologique. Programme scientifique Seine-Aval, 3. *IFREMER*, 39 p.
- Lesueur, P., Jouanneau, J.-M., Boust, D., Tastet, J.-P. & Weber, O.** (2001). Sedimentation rates and fluxes in the continental shelf mud fields in the Bay of Biscay (France). *Continental Shelf Research* 21, 1383-1401.
- Lesueur, P., Tastet, J.-P. & Weber, O.** (2002). Origin and morphosedimentary evolution of fine-grained modern continental shelf deposits: the Gironde mid fields (Bay of Biscay, France). *Sedimentology* 49, 1-22.
- Lesueur, P., Lesourd, S., Lefebvre, D., Garnaud, S. & Brun-Cottan, J.-C.** (2003). Holocene and modern sedimentation in the Seine estuary (France): a synthesis. *Journal of Quaternary Research* 18, sous presse.
- Liu, J.T., Liu, K.-j. & Huang, J.C.** (2002). The effect of a submarine canyon on the river sediment dispersal and inner shelf sediment movements in southern Taiwan. *Marine Geology* 181, 357-386.
- Mallet, C.** (1998). Carte sédimentologique de l'embouchure de la Gironde "de la pointe de la Coubre à la pointe de la Négade". SHOM.
- McCave, I.N.** (1972). Transport and escape of fine-grained sediments from shelf areas. In: Swift, D.J.P., Duane, D.B. & Pilkey, O.H. (Editors). *Shelf Sediment Transport: Process and Patterns*. Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Dowden, 225-248.
- McCave, I.N.** (1984). Erosion, transport and deposition of fine-grained marine sediments. In: Stow, D.A.V. & Piper, D.J.W. (Editors). *Fine-grained sediments: Deep-Water Process and facies*. Blackwell Scientific publications, 35-69.
- McKee, B.A., Nittrouer, C.A. & J., D.D.** (1983). Concepts of sediment deposition and accumulation applied to the continental shelf near the mouth of the Yangtze River. *Geology* 11, 631-633.
- Meade, R.H.** (1972). Sources and sinks of suspended matter on continental shelves. In: Swift, D.J.P., Duane, D.B. & Pilkey, O.H. (Editors). *Shelf Sediment Transport: Process and Patterns*. Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Dowden, 249-262.
- Migeon, S., Weber, O., Faugeres, J.C. & Saint-Paul, J.** (1999). SCOPIX: a new imaging system for core analysis. *Geo-Marine Letters* 18, 251-255.
- Milliman, J.D.** (1990). Les matières solides dans les mers littorales: flux et devenir. *Nature & Ressources* 26 (4), 12-22.
- Milliman, J.D. & Meade, R.H.** (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology* 91, 1-21.
- Milliman, J.D., Qin, Y., Ren, M.E. & Saito, Y.** (1987). Man's influence on the erosion and transport of sediment by Asian rivers, The Yellow River (Huanghe) example. *Journal of Geology* 95, 751-762.

- Mitchell, T.D., Hulme, M. & New, M. (2002). Climate data for political areas. *Area* 34, 109-112.
- Morzadec-Kerfourn, M.T. (1995). Coastal changes in the armorican massif (France) during the Holocene. *Journal of Coastal Research* 17, 197-203.
- Morzadec-Kerfourn, M.-T. & Delibrias, G. (1972). Analyses polliniques et datations radiocarbone des sédiments quaternaires prélevés en Manche centrale et orientale. *Mémoire du BRGM* 79, 160-165.
- Mulder, T. & Syvitski, J.P.M. (1995). Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans. *Journal of Geology* 103, 285-299.
- Mullenbach, B.L. & Nittrouer, C.A. (2000). Rapid deposition of fluvial sediment in the Eel Canyon, northern California. *Continental Shelf Research* 20, 2191-2212.
- Nittrouer, C.A. (1993). Controlling the ingredients that flow to the sea, oceanic processes near river mouths. *Oceanus* 36, 12-18.
- Nittrouer, C.A. (1999). The formation of continental-margin strata - Preface. *Marine Geology* 154, 1-1.
- Nittrouer, C.A., Sternberg, R.W., Carpenter, R. & Bennett, J.T. (1979). The use of  $^{210}\text{Pb}$  geochronology as a sedimentological tool: Application to the Washington continental shelf. *Marine Geology* 31, 297-316.
- Nittrouer, C.A. & Sternberg, R.W. (1981). The formation of sedimentary strata in an allochthonous shelf environment: the Washington continental shelf. *Marine Geology* 42, 201-232.
- Nittrouer, C.A., Sharara, M.T. & DeMaster, D.J. (1983). Variations of sediment texture on the Amazon continental shelf. *Journal of Sedimentary Petrology* 53 (1), 179-191.
- Nittrouer, C.A., McKee, B.A. & DeMaster, D.J. (1984). Fine-scale stratigraphy in proximal and distal deposits of sediment dispersal systems in the East China Sea. *Marine Geology* 61, 13-24.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., Kuehl, S.A., McKee, B.A. & Thorbjarnarson, K.W. (1984-1985). Some questions and answers about the accumulation of fine-grained sediment in continental margin environments. *Geo-Marine Letters* 4, 211-213.
- Nittrouer, C.A. & DeMaster, D.J. (1986). Sedimentary processes on the Amazon continental shelf: past, present, and future research. *Continental Shelf Research* 6 (1/2), 5-30.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., Kuehl, S.A. & Kowsmann, R.O. (1986a). The deltaic nature of Amazon shelf sedimentation. *Geological Society of American Bulletin* 97, 444-458.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., Kuehl, S.A. & McKee, B.A. (1986b). Association of sand with mud deposits accumulating on continental shelves. In: Knight, R.J. & McLean, J.R. (Editors). *Shelf Sands and Sandstones*. Canadian Society of Petroleum Geologists, 17-25.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., Figueiredo, A.G. & Rine, J.M. (1991a). AmasSeds: an interdisciplinary investigation of a complex coastal environment. *Oceanography* 4, 3-7.
- Nittrouer, C.A., Kuehl, S.A., Rine, J.M., Figueiredo, A.G., Faria, L.E.C., Dias, G.T.M., Silva, M.A.M., Allison, M.A., Pacioni, T.D., Segall, M.P., Underkoffler, E.C., Borges, H.V. & Silveira, O.F. (1991b). Sedimentology and stratigraphy of the Amazon continental shelf. *Oceanography* 4, 33-38.
- Nittrouer, C.A. & Wright, L.D. (1994). Transport of particles across continental shelves. *Reviews of Geophysics*, 85-113.
- Nittrouer, C.A. & DeMaster, D.J. (1996). The Amazon shelf setting - tropical, energetic, and influenced by a large river. *Continental Shelf Research* 16 (5-6), 553-573.
- Nittrouer, C.A. & Kravitz, J.H. (1996). STRATAFORM: A program to study the creation and interpretation of sedimentary strata on continental margins. *Oceanography* 9 (3), 146-152.
- Nittrouer, C.A., Kuehl, S.A., Figueiredo, A.G., Allison, M.A., Sommerfield, C.K., Rine, J.M., Faria, L.E.C. & Silveira, O.M. (1996). The geological record preserved by Amazon shelf sedimentation. *Continental Shelf Research* 16 (5/6), 817-841.
- Nittrouer, C.A. & Kravitz, J.H. (1998). STRATAFORM Programm. <http://strata.ocean.washington.edu/>.
- Oliveira, A., Vitorino, J., Rodrigues, A., Jouanneau, J.-M., Dias, J.A. & Weber, O. (2002). Nepheloid layer dynamics in the northern Portuguese shelf. *Progress in Oceanography* 52 (2-4), 195-213.
- Palanques, A. & Drake, D.E. (1990). Distribution and dispersal of suspended particulate matter on the Elbro continental shelf, northwestern Mediterranean Sea. *Marine Geology* 95, 193-206.

- Park, Y.A., Kim, S.-C. & Choi, J.-H.** (1986). The distribution and transportation of fine-grained sediments on the inner continental shelf off the Keum River estuary, Korea. *Continental Shelf Research* 5, 499-519.
- Park, Y.A. & Khim, B.K.** (1992). Origin and dispersal of recent clay minerals in the Yellow Sea. *Marine Geology* 104, 205-213.
- Parsons, J.D., Bush, J.W.M. & Syvitski, J.P.** (2001). Hyperpycnal plume formation from riverine outflows with small sediment concentration. *Sedimentology* 48, 465-478.
- Pinot, J.-P.** (1974). Le précontinent breton entre Penmarc'h, Belle-Ile et l'escarpement continental. Etude géomorphologique. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Brest*, 256 p.
- Pouliquen, M.** (1975). Etude minéralogique et géochimique des sédiments du littoral vendéo-charentais et de la vasière ouest-Gironde (France): application à la connaissance de l'origine et de la dynamique des vases dans la baie de Marennes-Oléron. *Thèse d'Etat de l'Université de Bordeaux I*, 159 p.
- Puig, P., Ogston, A.S., Mullenbach, B.L., Nittrouer, C.A. & Sternberg, R.W.** (2003). Shelf-to-canyon sediment-transport processes on the Eel continental margin (northern California). *Marine Geology* 193, 129-149.
- Pujos, M. & Javelaud, O.** (1991). Depositional facies of a mud shelf between the Sinu river and the Darien Gulf (Caribbean coast of Colombia); Environmental factors that control its sedimentation and origin of deposits. *Continental Shelf Research* 11, 601-623.
- Rhoads, D.C.** (1974). Organism-sediment relations on the muddy sea floor. *Oceanography and Marine Biology* 12, 263-300.
- Ruch, P., Mirmand, M., Jouanneau, J.-M. & Latouche, C.** (1993). Sediment budget and transfer suspended sediment from Gironde estuary to Cap Ferret Canyon. *Marine Geology* 111, 109-119.
- Sandford, L.P. & Halka, J.P.** (1993). Assessing the paradigm of mutually exclusive erosion and deposition of mud, with examples from upper Chesapeake Bay. *Marine Geology* 114, 37-57.
- Servais, P., Castignolles, N., Petit, F., George, I., Buffet-Janvresse, C. & Ficht, A.** (1999). Contaminations bactérienne et virale. Programme Scientifique Seine-Aval, 6. *IFREMER*, 26 p.
- Shepard, F.P.** (1932). Sediments on continental shelves. *Geological Society of America Bulletin* 43, 1017-1034.
- SHOM** (1968). Courants de marée dans la Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique. *Imprimerie Nationale, Paris*, 287 p.
- SHOM** (1996). Courants de marée: Baie de Seine de Cherbourg à Fécamp. Courants de marée en France. *EPSHOM, Brest*, 54 p.
- Sternberg, R.W.** (1981). Sedimentation processes on continental shelves. In: Haq, B.U. & Milliman, J.D. (Editors). *Marine geology and oceanography of Arabian sea and coastal Pakistan*. Scientific and Academic Editions, New York, 137-157.
- Su, C.-C. & Huh, C.-A.** (1999). Sedimentation dynamics in the East China Sea elucidated from <sup>210</sup>Pb, <sup>137</sup>Cs, <sup>239,240</sup>Pu. *Marine Geology* 160, 183-196.
- Swift, D.J.P.** (1970). Quaternary shelves and the return to grade. *Marine Geology* 8, 5-30.
- Swift, D.J.P., Stanley, D.J. & Curray, J.R.** (1971). Relict sediments on continental shelves: a reconsideration. *Journal of Geology* 79 (3), 322-346.
- Syvitski, J.P. & Morehead, M.D.** (1999). Estimating river-sediment discharge to the ocean: application to the Eel margin, northern California. *Marine Geology* 154, 13-28.
- Thiébaud, E.** (1996). Distribution of *Pectinaria koreni* larvae (annelida: polychaeta) in relation to the Seine river plume front (eastern English Channel). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73, 383-397.
- Thiébaud, E., Cabioch, L., Dauvin, J.-C., Retière, C. & Gentil, F.** (1997). Spatio-temporal persistence of the *Abra Alba-Pectonaria Koreni* muddy-fine sand community of the eastern bay of seine. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 77, 1165-1185.
- Trowbridge, J.H. & Nowell, A.R.M.** (1994). An introduction to the sediment Transport Events on Shelves and Slopes (STRESS) Programm. *Continental Shelf Research* 14 (10/11), 1057-1061.
- Vaslet, D., Larsonneur, C. & Auffret, J.-P.** (1978). Carte des sédiments superficiels de la Manche au 1:500 000<sup>e</sup> et notice explicative. B.R.G.M, Orléans, 17 p.

- Verger, F.** (1970). Carte géomorphologie de l'anse de l'Aiguillon. Association des amis et anciens de l'Institut de géographie de l'Université de Paris.
- Wright, J.D., Wiseman, W.J., Yang, Z.-S., Bornhold, B.D., Keller, G.H., Prior, D.B. & Suhayda, J.N.** (1990). Processes of marine dispersal and deposition of suspended silts off the modern mouth of the Huanghe (Yellow River). *Continental Shelf research* 10, 1-40.
- Wright, L.D. & Nittrouer, C.A.** (1995). Dispersal of river sediments in coastal seas: six contrasting cases. *Estuaries* 18 (3), 494-508.
- Wright, L.D., Schaffner, L.C. & Maa, J.P.-Y.** (1997). Biological mediation of bottom boundary layer processes and sediment suspension in the lower Chesapeake Bay. *Marine Geology* 141, 27-50.
- Xu, J.P., Noble, M., Eittrheim, S.L., Rosenfeld, L.K., Schwing, F.B. & Pilskaln, C.H.** (2002). Distribution and transport of suspended particulate matter in Monterey Canyon, California. *Marine Geology* 181, 215-234.
- Yang, S.Y., Jung, H.S., Choi, M.S. & Li, C.X.** (2002). The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 201, 407-419.

## Chapitre II

---

# Couverture sédimentaire meuble de la Baie de Seine orientale : caractéristiques des modifications lithologiques depuis deux siècles

<b>1. Méthode de reconnaissance des sédiments superficiels de la Baie de Seine orientale .....</b>	<b>59</b>
1.1 Méthode du plomb suiffé .....	59
1.2 Techniques récentes d'échantillonnage.....	60
<b>2. Bilan de la répartition des faciès sédimentaires en Baie de Seine sud-orientale avant 1913.....</b>	<b>61</b>
2.1 Type de données disponibles.....	61
2.2 Cartes de synthèse des faciès sédimentaires au début et à la fin du XIX <sup>ème</sup> siècle (cartes de 1834, 1880 et 1894) .....	61
2.3 Carte de synthèse des faciès sédimentaires au début du XX <sup>ème</sup> siècle (1913).....	66
2.4 Discussion .....	66
<b>3. Distribution des fractions fines en Baie de Seine orientale depuis 1967 .....</b>	<b>70</b>
3.1 Situation décrite en 1967 .....	71
3.2 Situation décrite en 1977 .....	72
3.2.1 Couverture sédimentaire superficielle.....	72
3.2.2 Argiles holocènes dans les fonds marins subtidaux au large de Cabourg.....	72
3.3 Situation actuelle: données VASTEDEBA 2000 .....	73
3.4 Bilan: évolution spatio-temporelle de la couverture sédimentaire de la Baie de Seine orientale depuis 30 ans .....	75
<b>4. Synthèse de l'évolution des fonds sédimentaires au cours des deux derniers siècles.....</b>	<b>76</b>

## Chapitre II

---

# Couverture sédimentaire meuble de la Baie de Seine orientale : caractéristiques des modifications lithologiques depuis deux siècles

La première carte des fonds sédimentaires de la Baie de Seine a été publiée en 1909 par Thoulet à partir d'une synthèse de données de plomb suiffé sur l'ensemble de la Baie de Seine orientale (Thoulet, 1908-1909). Depuis, de nombreux auteurs se sont intéressés à ce secteur soumis directement à l'influence des apports de la Seine et aux conséquences des nombreux aménagements réalisés au sein de l'estuaire. La répartition des sédiments de la couverture sédimentaire proposée par Larsonneur (1971) à la fin des années 1960 montrait une prédominance de sables moyens à fins dans la partie orientale de la baie, mais une tendance à l'envasement avait déjà été notée par Avoine dès 1977. Les données récentes acquises lors des missions VASTEDEBA viennent compléter et actualiser nos connaissances sur l'évolution des fonds sédimentaires de la Baie de Seine sud-orientale. La mise à disposition par le SHOM de documents anciens datant du début et de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle a permis de reconstituer les faciès sédimentaires de cette époque et ainsi de caractériser l'évolution des fractions fines avant même les aménagements majeurs de l'estuaire de la Seine.

### 1. Méthode de reconnaissance des sédiments superficiels de la Baie de Seine orientale

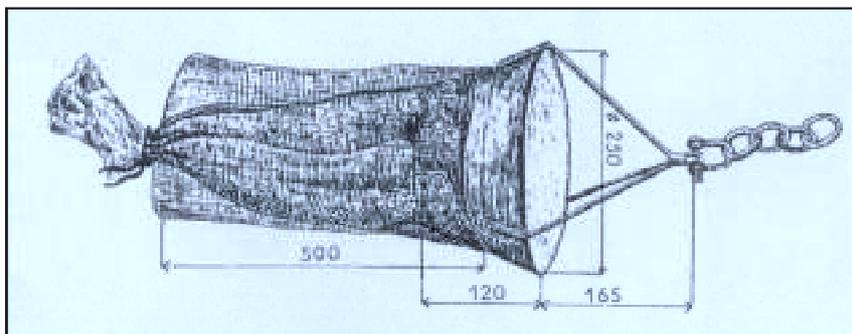
#### 1.1 Méthode du plomb suiffé

La méthode du plomb suiffé a été utilisée à partir des années 1810-1820 afin de cartographier l'ensemble du domaine côtier français sous la direction de l'ingénieur hydrographe Mr Beautemps-Beaupré. Elle a été utilisée jusqu'en 1940 (Garlan, 1995b, a). Ce système permettait de procéder à des reconnaissances rapides de la bathymétrie des fonds marins grâce à un plomb de sonde de 5 kg descendu à l'aide d'un touret et positionné au cercle hydrographique. Le plomb de sonde comportait également une cavité remplie de suif sur la face inférieure. Ainsi, au contact avec le fond, les sédiments les plus fins adhéraient au suif tandis que les sédiments plus grossiers de type graviers et galets laissaient seulement une empreinte. Ces informations sur la nature du fond étaient reportées à côté de chaque point de sonde selon un codage bien

défini: Sf (sable fin), Sv (sable vaseux), Gr (graviers),... Ces relevés étaient effectués selon un maillage très serré à proximité des côtes: les points étant souvent distants de seulement 20 à 40 mètres et les profils de 75 à 100 mètres. Tout le littoral de la façade Atlantique, Manche, Méditerranée et Outre-mer a ainsi été cartographié entre les années 1820 et 1940, constituant une précieuse base de données de plusieurs centaines de milliers d'annotations de nature de fond des côtes françaises. Ces données sont encore couramment utilisées par le SHOM pour la réalisation des cartes sédimentologiques (cartes G) et permettent de palier le manque de données récentes dans les secteurs ayant connu peu d'évolution des fonds au cours des temps (Gabeloteau, 1994; Garnaud, 1998; Garnaud & Garlan, 1998; Garnaud, 2002). Les cartes de nature des fonds les plus anciennes exploitées en vue d'une comparaison avec nos résultats avaient été réalisées à partir d'observations issues de cette méthode du plomb suiffé.

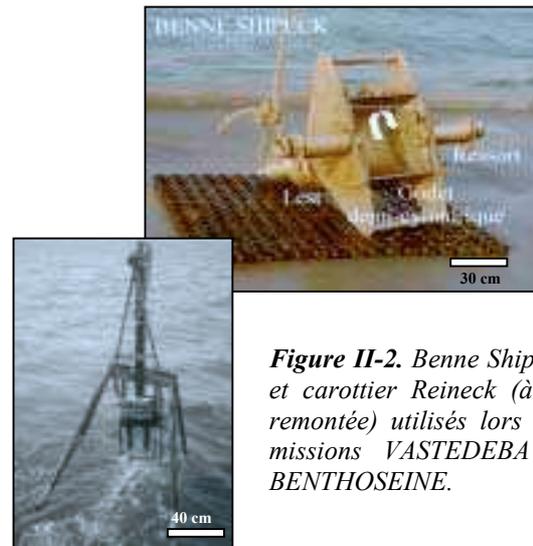
### 1.2 Techniques récentes d'échantillonnage

Afin de caractériser la nature des sédiments, les fonds de la Baie de Seine ont été prospectés avec différents moyens de prélèvements dès les années 1960 (Larsonneur & Hommeril, 1967; Larsonneur, 1971; Vaslet *et al.*, 1978; Larsonneur *et al.*, 1982). A l'époque, les prélèvements étaient systématiquement réalisés à l'aide d'une drague de type Rallier du Baty pour remonter le matériel grossier qui constituent les fonds de la plus grande partie de la Baie de Seine (Larsonneur, 1971). Cette méthode d'échantillonnage consistait à traîner un large filet sur le fond, sur une distance plus ou moins longue, et d'en récolter son contenu une fois remonté sur le bateau. Cette technique avait le désavantage de mélanger les sédiments superficiels et de lessiver les fractions fines du sédiment. Dans les fonds meubles et peu profonds de la Baie de Seine, Larsonneur (1964) a par contre utilisé une drague plus spécifique, formée d'une partie métallique tronc-conique où s'accrochait un sac en toile finement tissé (*fig. II-1*). Elle avait l'avantage d'être moins perméable aux fractions fines mais les mélanges restent néanmoins importants; c'est pourquoi les prélèvements sédimentaires s'effectuaient alors au milieu du sac.



**Figure II-1.** Drague utilisée dans les fonds meubles et peu profonds de la Baie de Seine lors des campagnes de prélèvements effectuées entre 1960 et 1975 (Larsonneur, 1964).  
Dimensions en cm

A la fin des années 1970, lors de ses différents travaux de reconnaissance des fonds marins superficiels, Avoine a utilisé des moyens de prélèvement plus ponctuels que la drague, de type bennes (Shipeck et Hamon) et carottiers permettant de recueillir des sédiments peu remaniés (superposition des faciès) et non lessivés. Ces techniques d'échantillonnage sont analogues à celles que nous avons employées lors des missions BENTHOSEINE et VASTEDEBA (*fig. II-2*) ce qui permettra de comparer directement nos cartes actuelles avec celles établies entre 1970 et 1985.



*Figure II-2. Benne Shipeck et carottier Reineck (à sa remontée) utilisés lors des missions VASTEDEBA et BENTHOSEINE.*

## 2. Bilan de la répartition des faciès sédimentaires en Baie de Seine sud-orientale avant 1913

### 2.1 Type de données disponibles

Les cartes disponibles proviennent des archives du SHOM de Brest où j'ai pu consulter les cartes originales datant de plus de 200 ans. Ces cartes sont présentées comme des minutes d'écriture de sonde où figurent à la fois les profondeurs d'eau et la nature des fonds obtenue par la méthode du plomb suiffé. Ces archives avaient déjà été partiellement exploitées, mais les données datant de 1834 et 1889 avaient été présentées sur une même carte de synthèse avec une bathymétrie d'époque différente (Laignel, 1991; Lesourd *et al.*, 2001). J'ai repris l'interprétation de toutes les minutes de sonde originales de la partie sud-orientale de la Baie de Seine en ayant également retrouvé deux minutes inédites de 1880 et 1894. Ainsi, les quatre cartes présentées datent respectivement du début et la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, et du début du XX<sup>ème</sup> siècle. Elles fournissent de précieuses informations sur la répartition des sédiments dans la partie sud-orientale proche de l'estuaire de la Seine, avant l'époque des grands aménagements.

### 2.2 Cartes de synthèse des faciès sédimentaires au début et à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle (cartes de 1834, 1880 et 1894)

La figure II-3 a été réalisée par l'interprétation de la carte de l'écriture de sonde de 1834 qui présentent plus de 450 sondes au plomb suiffé. Le faciès sableux domine et recouvre plus de

60 % des fonds tandis que les faciès vaseux peu représentés (~ 10%) sont cantonnés à trois secteurs adjacents au chenal principal:

- (1) un secteur abrité à l'arrière du plateau rocheux de Villerville, et jusqu'à Deauville, où se situe une longue ceinture de vase (6 km de long) à l'intérieur d'une dépression bathymétrique comprise entre -3 et -6 m CM,
- (2) des vases et sables vaseux sur le pourtour du poulier du banc du Ratier, en domaine abrité des courants de flot et jusant,
- (3) en domaine intertidal entre Villerville et Pennedepie, sous la forme de vasières de dimensions assez réduites; des tourbes littorales sont également annotées entre Criqueboeuf et Pennedepie.

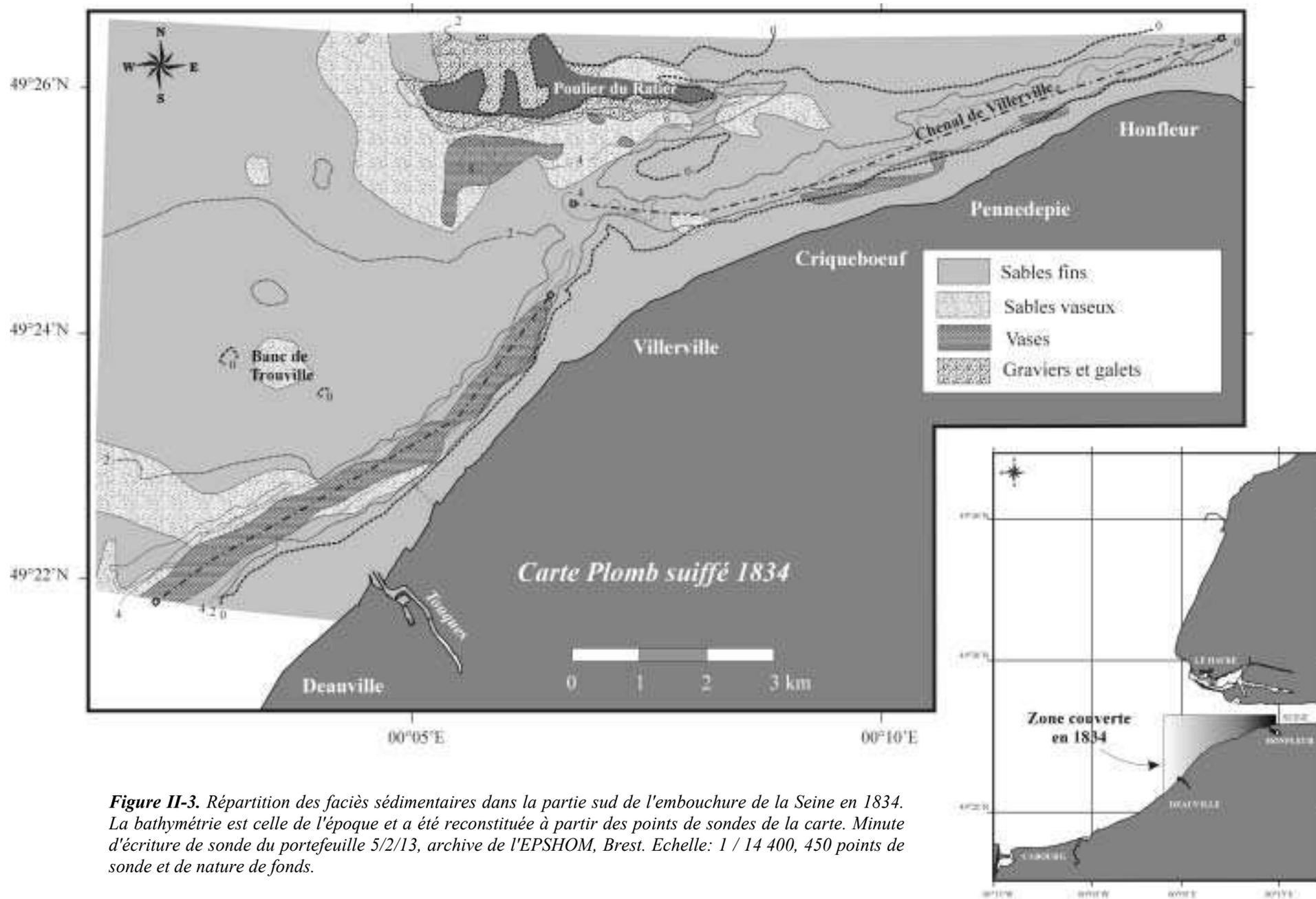
A l'époque, l'estuaire de la Seine est encore relativement "sauvage" et, dans ce régime macrotidal, les courants de marée empruntaient parmi les chenaux présents en 1834, préférentiellement le chenal sud de la Seine de direction WSW (appelé chenal de Villerville, représenté en tiret sur la figure II-3), longeant alors la côte depuis Honfleur jusqu'à Villerville. Arrivé à la hauteur du large platier rocheux face à Villerville, le chenal contourne cet obstacle naturel puis emprunte une direction ouest avant de reprendre une direction SW. Bien qu'on ne dispose d'aucune mesure de courants de marée à l'intérieur de ces chenaux, la carte de répartition des faciès sédimentaires laisse supposer que les dépôts de sédiments fins permanents n'étaient pas possible entre Villerville et Honfleur dans cette partie la plus amont et étroite du chenal de Villerville en raison des très fortes vitesses de courants de marée qui devaient y régner. Par contre, dans la partie aval du chenal, entre Deauville et Villerville, les dépôts vaseux sont importants, certainement liés à une diminution de la vitesse des courants permettant le piégeage des sédiments fins au sein de cette dépression bathymétrique.

Au large, la limite intertidale contourne le banc du Ratier présent dès cette époque et apparaît également au large de Deauville où les quelques valeurs positives correspondent au banc relique de Trouville (*fig. II-3*). D'après Vigarié (1964), celui-ci émergeait avec certitude de 1645 à 1776 (documents cartographiques), car les archives nous indiquent que les parties herbées appartenant à l'abbaye de Criqueboeuf, servaient à faire paître les bovins (appelé à l'époque Banc à Bœufs<sup>1</sup>). Cependant, sur la carte de 1834, le banc de Trouville très amaigri est réduit à un étroit plateau de seulement 400 m<sup>2</sup> (*fig. II-3*).

---

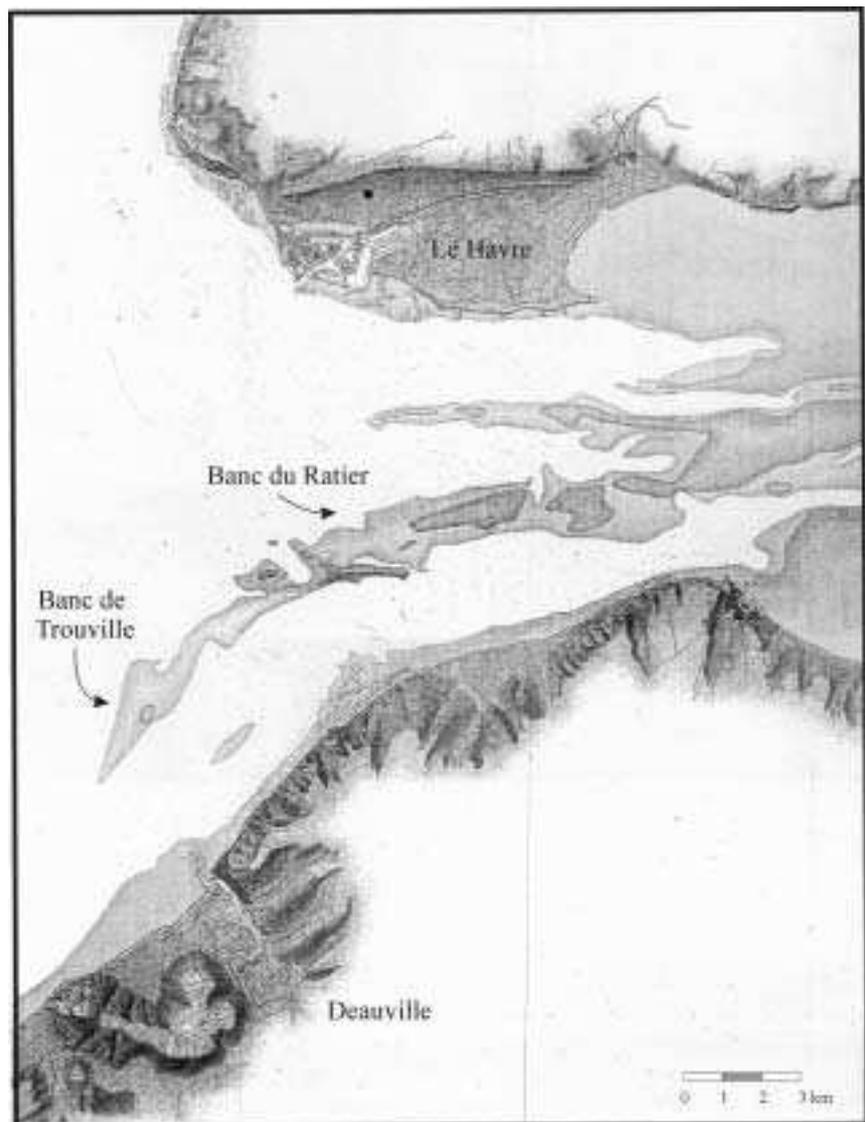
<sup>1</sup> Le banc à Bœufs correspond tantôt à la partie ENE du banc de Trouville, tantôt un banc individualisé prolongeant le banc du Ratier à l'Ouest (Vigarié, 1964).

<sup>2</sup> Vigarié (1964) précise qu'en 1834, la cote 0 était rapportée aux plus basses mers observées et non, comme cela a été le cas pour les autres cartes, aux plus basses mers astronomiques. Le banc de Trouville pouvait donc en 1834 encore exceptionnellement découvrir à la faveur des grandes marées d'équinoxe.

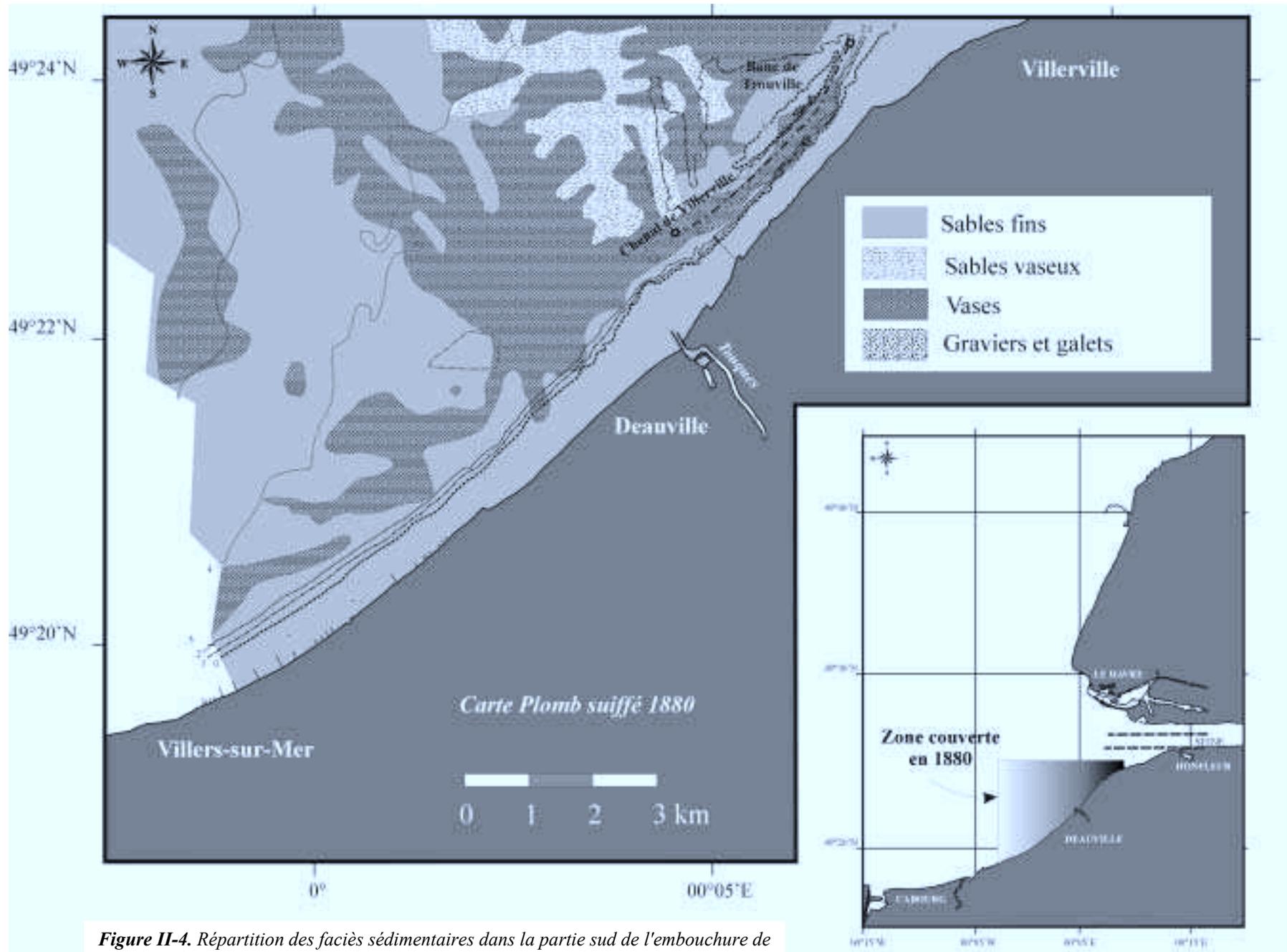


La minute de sonde inédite de 1880 comporte plus de 300 annotations de plomb suiffé. La zone géographique prospectée diffère de celle de 1834: le secteur de l'embouchure n'a pas été couvert, tandis que la région plus à l'ouest de Villers-sur-Mer l'est (*fig. II-4*). Contrairement à la situation de 1834, ce sont les zones de vase et de sables vaseux qui dominent largement sur plus de 70% de la zone couverte. La zone sableuse la plus importante longe le littoral depuis le domaine intertidal et jusqu'à -2 m CM maximum. La dépression bathymétrique vers le sud-ouest au large de Deauville a disparu, seul persiste plus à l'est le chenal amont de Villerville. Le comblement de cette partie de l'ancien chenal de Villerville s'est peut-être fait au dépens du banc de Trouville qui, en 1880, a été complètement nivelé à la cote des -3 m CM.

A cette époque, la divagation des chenaux de l'embouchure de la Seine génère des variations importantes de la couverture sédimentaire des fonds de la Baie de Seine orientale. En effet, la configuration de l'estuaire de la Seine, d'après un document topographique du SHOM réalisé en 1854-1855, montre que la navigation s'effectuait principalement par la passe la plus au sud de l'embouchure (*fig. II-5*). Seuls deux chenaux principaux apparaissent sur cette carte; le banc de Trouville était même raccordé au banc du Ratier par sa partie Ouest. Vigarié (1964) signale également, d'après des documents hydrographiques de 1853 et 1869, que l'estuaire se trouve en période d'engraissement (par rapport à la situation de 1834) avec la construction de bancs sableux intertidaux pouvant dépasser plus de +2 m CM.



**Figure II-5.** Carte topographique de l'embouchure de la Seine réalisée entre 1854 et 1855 par les ingénieurs du SHOM. Isobathes 0 m, +1 m, +2 m représentées en nuances de gris de plus en plus foncées.



**Figure II-4.** Répartition des faciès sédimentaires dans la partie sud de l'embouchure de la Seine en 1880. Bathymétrie de l'époque. Minute d'écriture de sonde du portefeuille 5/3/19, archive de l'EPSHOM, Brest. Echelle: 1 / 14 400, 300 points de sonde et de nature de fonds. Carte exécutée par l'ingénieur hydrographe M. Germain assisté de M. Favé, Mion et La Porte.

La carte de 1894 (*fig. II-6*, 450 points de sondes) présente la même coupure géographique que celle de 1880. Les zones envasées observées en 1880 sont toujours visibles mais les limites ont évolué et progressé. La couverture vaseuse atteint plus de 85% de l'aire étudiée et des zones à galets apparaissent. Pendant les 15 années qui séparent les deux missions de reconnaissance (1880-1895), les fonds bathymétriques ont peu évolué (*fig. II-6*).

### 2.3 Carte de synthèse des faciès sédimentaires au début du XX<sup>ème</sup> siècle (1913)

A la différence des cartes éditées en 1880 et 1894 marquées par un nombre restreint de données, la carte de 1913 présente une densité exceptionnelle d'annotations de nature de fond (près de 14 500 points de sonde<sup>3</sup>). Les modifications des limites de faciès sédimentaires apparaissent très importantes depuis 1894. Ce sont les sables qui dominent et les sédiments vaseux ou sablo-vaseux ne représentent plus que 15 à 20% des sédiments marins de cette partie de l'embouchure de la Seine (*fig. II-7*). Les vases présentes en 1834, 1880 et 1894 entre Deauville et Villers-sur-Mer se réduisent à quelques taches envasées dans un environnement à dominance sableuse. Le plus grand ensemble vaseux s'est mis en place selon un arc à convexité tourné vers l'ouest, à l'arrière entre le banc du Ratier et face à Trouville-sur-mer. Cette ceinture de vase se développe à l'avant d'une grande zone très peu profonde, située entre la limite intertidale et -1m CM, reliant le banc du Ratier au banc de Trouville qui réapparaît sur cette carte marine de 1913 à la cote de 0 à +1 m CM.

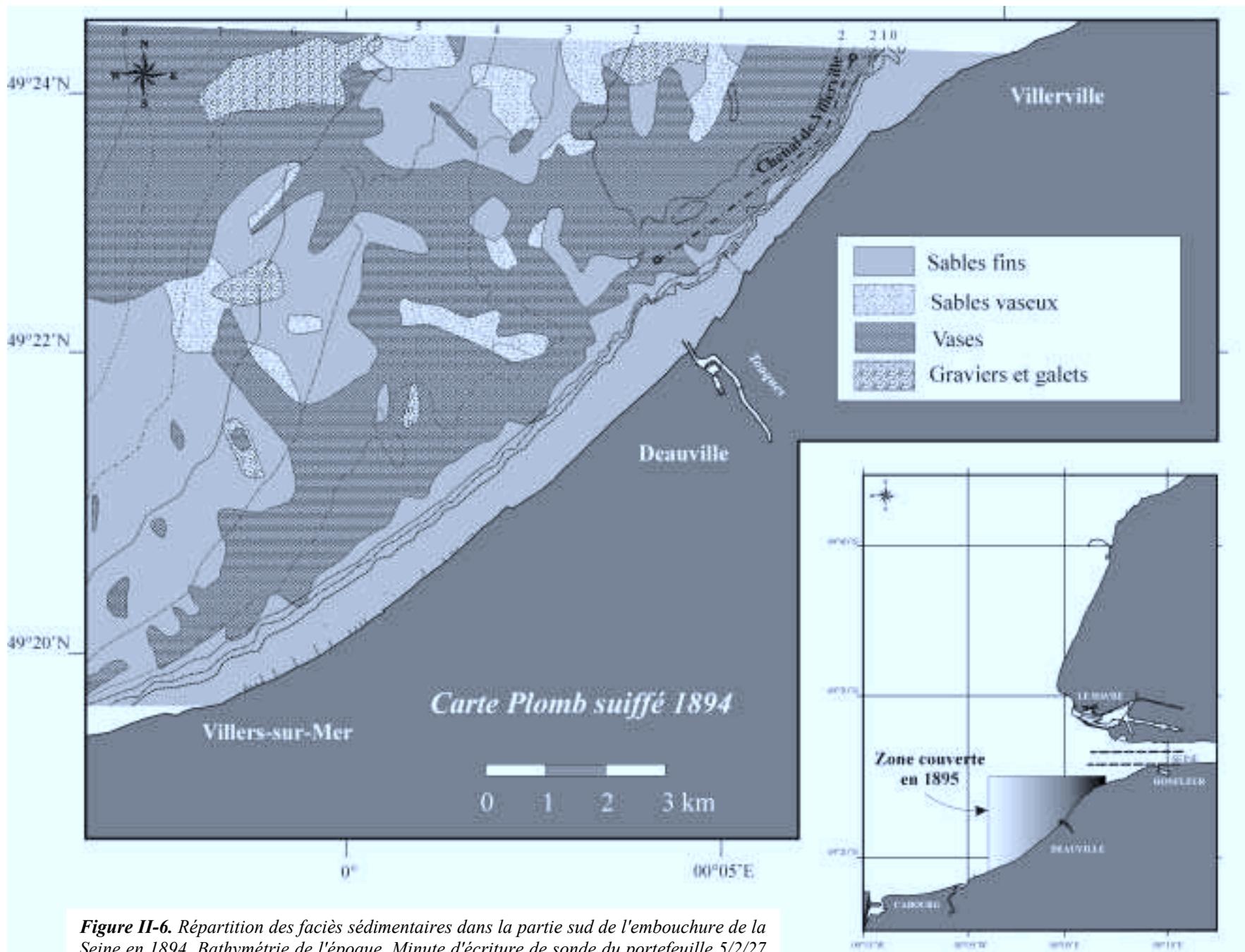
La carte de synthèse de 1913 (Laignel, 1991; Lesourd *et al.*, 2001) des faciès sédimentaires regroupant à la fois l'embouchure de la Seine et les secteurs adjacents montre que les zones vaseuses s'étendent également vers la partie nord-orientale dans les fonds subtidaux: Petite Rade face au Havre et nord du banc d'Amfard et du Havre; mais une tendance nette à l'accroissement des zones sableuses se dessine, contemporaine de la construction d'une digue insubmersible au nord du chenal d'accès à la Seine.

### 2.4 Discussion

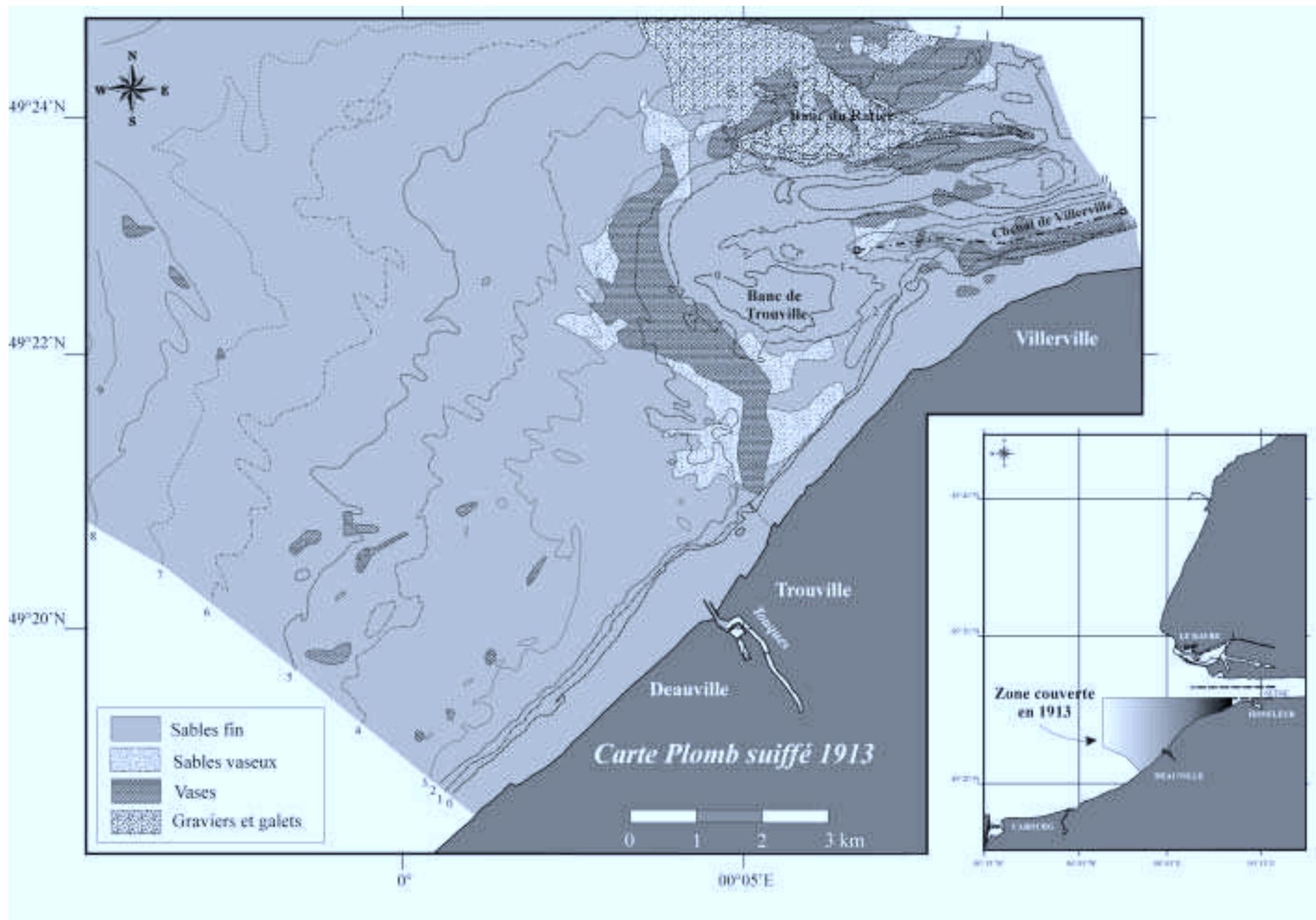
Les quatre cartes présentées couvrent l'évolution de la répartition des faciès sédimentaires de la partie sud-est de l'embouchure de la Seine sur une période de 80 ans. Les deux cartes les plus rapprochées dans le temps, celles de 1880 et 1894, ne montrent guère de modifications des limites de faciès sédimentaires et de la bathymétrie.

---

<sup>3</sup> Les échantillonnages le long des profils sont réalisés tous les 25 m et les profils sont espacés de 150 m. Minute d'écriture de sonde du portefeuille 5/3/39 calque n°3: mission de la Seine 1913, région sud du méridien de Criqueboeuf au méridien ouest du phare sud de la Hève. Echelle: 1 / 15 000. Archive EPSHOM Brest.



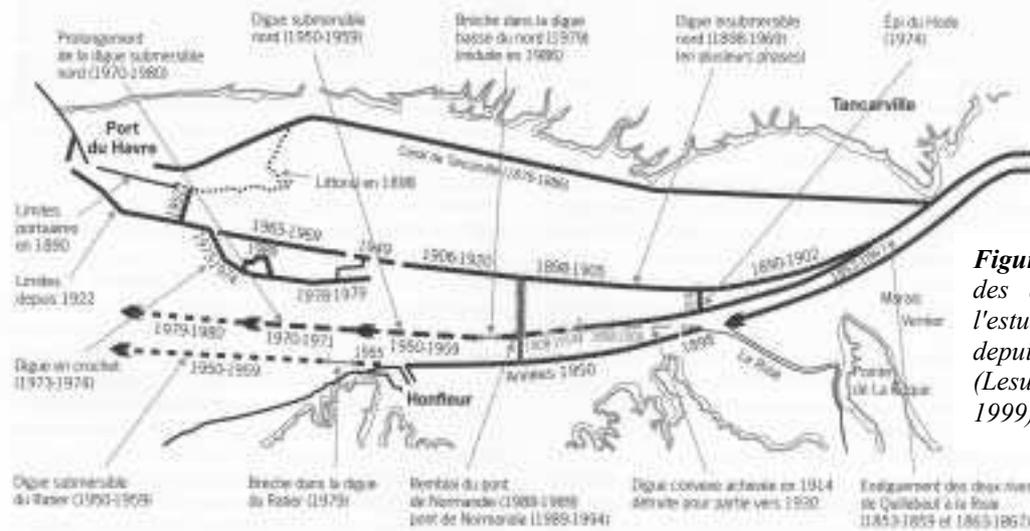
**Figure II-6.** Répartition des faciès sédimentaires dans la partie sud de l'embouchure de la Seine en 1894. Bathymétrie de l'époque. Minute d'écriture de sonde du portefeuille 5/2/27 n°3 (bathymétrie) et 5/2/54 n°5 (nature des fonds), archive de l'EPSHOM, Brest. Echelle: 1 / 14 400; 300 points de sonde et de nature de fonds. Carte exécutée par l'ingénieur hydrographe M. Reynaud assisté de M. Fichot, De Vanssay de Blavous, Leinekugel.



**Figure II-7.** Répartition des faciès sédimentaires dans la partie sud de l'embouchure de la Seine en 1913. Bathymétrie de l'époque. Minute d'écriture de sonde du portefeuille 5/2/27 n°3; 15 000 points de sonde et de nature de fonds. Echelle: 1 / 15 000. Archive de l'EPSHOM, Brest. Auteurs non précisés sur la minute de sonde.

Par contre, à plus longue échelle de temps, la comparaison des cartes de 1834, 1894 et 1913 témoigne de changements majeurs tant dans la nature que dans la profondeur des fonds marins. L'impact de l'évolution saisonnière sur la répartition des faciès, et en particulier des apports en matériel fin, ne peut être extrait de ces cartes. En effet, la réalisation de certaines minutes de sonde, comme celle de 1913, s'est déroulée sur plusieurs mois voire sur plusieurs années compte tenu du nombre élevé de points réalisés. A partir de la situation de référence de 1834, on remarque que les fonds voisins de l'embouchure de la Seine se sont depuis largement ensasés en 1880 et 1894.

Il n'existe hélas pas de carte intermédiaire qui permettrait de fixer la période marquant le début de l'ensablement de cette partie de la Baie de Seine. Dans la littérature ancienne (Lavoine, 1885; Lennier, 1885), les avis divergent quant à l'explication de cet ensablement en 1880 et 1894 de ce secteur et constaté en même temps plus au nord (carte des abords du Havre de 1883, *in* Lennier, 1885). En fait, la question posée à l'époque s'appuie essentiellement sur l'impact réel de la construction de la digue (*fig. II-8*) située sur les deux rives entre la Mailleraye (pk 302) et la Risle (Lesueur & Lesourd, 1999) entre 1848 et 1867. En effet, la sédimentation fine localisée auparavant entre Honfleur et la Risle aurait pu migrer vers l'aval sous l'effet de la chasse plus puissante résultant de l'endiguement de ce tronçon. Toutefois, cette époque correspond également à des conditions hydrologiques et météorologiques intenses (e.g. fortes érosions à Deauville) ayant aussi bouleversé la morphologie de l'embouchure et donc la répartition des stocks sédimentaires sableux et vaseux.



**Figure II-8.** Chronologie des aménagements dans l'estuaire de la Seine depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle (Lesueur & Lesourd, 1999).

D'une manière générale, la divagation des chenaux principaux de l'estuaire de la Seine (1, 2 ou 3 chenaux selon l'époque) a souvent remodelé la morphologie de l'embouchure au cours de son histoire. Les conséquences de ces évolutions ont été à l'origine, pour la période 1880-1894, de l'engraissement ou l'érosion du banc de Trouville, et du comblement de la longue fosse au large de Deauville et Villerville en 1834 complètement remplie dès 1880.

L'évolution du banc sableux de Trouville est également un bon marqueur de la transformation des fonds à proximité de l'embouchure: présent sur seulement 400 m de large en 1834 lors des basses mers d'équinoxe, il affleure largement en 1854-1855 puis se retrouve complètement nivelé à la cote -3 m CM en 1880-1894, et enfin il réapparaît en 1913 à la cote de +1 et 0 m CM. Ce banc, typiquement instable, évolue de manière intermittente en réponse aux modifications environnementales de l'estuaire. Ces changements ont été rapides et importants jusqu'à la construction de la digue du Ratier barrant la passe de Villerville (1950-1959).

En 1913, les fonds marins situés à l'ouest de Deauville sont caractérisés par une couverture sableuse avec la réduction des espaces envasés à proximité de l'embouchure. Cette évolution est certainement en relation avec les premiers aménagements importants de l'embouchure, c'est à dire la construction de digues insubmersibles nord et sud jusqu'en amont d'Honfleur (1894-1905). Une hypothèse est que cet endiguement a permis de canaliser l'écoulement, favorisant ainsi le déplacement plus en aval de la sédimentation sableuse et le piégeage latéral amont de la sédimentation fine. Les premières années du XX<sup>ième</sup> siècle sont également l'époque de l'ouverture du chenal ouest d'accès au Port du Havre, le précédent orienté vers le sud étant comblé par des sables (Lesueur & Lesourd, 1999).

La carte de 1913 de la répartition des faciès sédimentaires est l'unique document du début du XX<sup>ème</sup> siècle en Baie de Seine sud-orientale. En effet, la carte de Thoulet publiée en 1910 n'utilise pas de données récentes dans le secteur nord-oriental et s'appuie sur les annotations antérieures de plomb suiffé (Thoulet, 1908-1909). Les documents cartographiques récents qui ont succédé à la carte de plomb suiffé de 1913, ne se retrouvent qu'à partir de 1967, et sont issus d'anciens travaux sur la Baie de Seine sud-orientale de l'université de Caen (Larsonneur & Hommeril, 1967). La période entre 1913 et 1967 de la sédimentation sur ce secteur ne peut donc être couverte dans cette étude faute de données disponibles.

### **3. Distribution des fractions fines en Baie de Seine orientale depuis 1967**

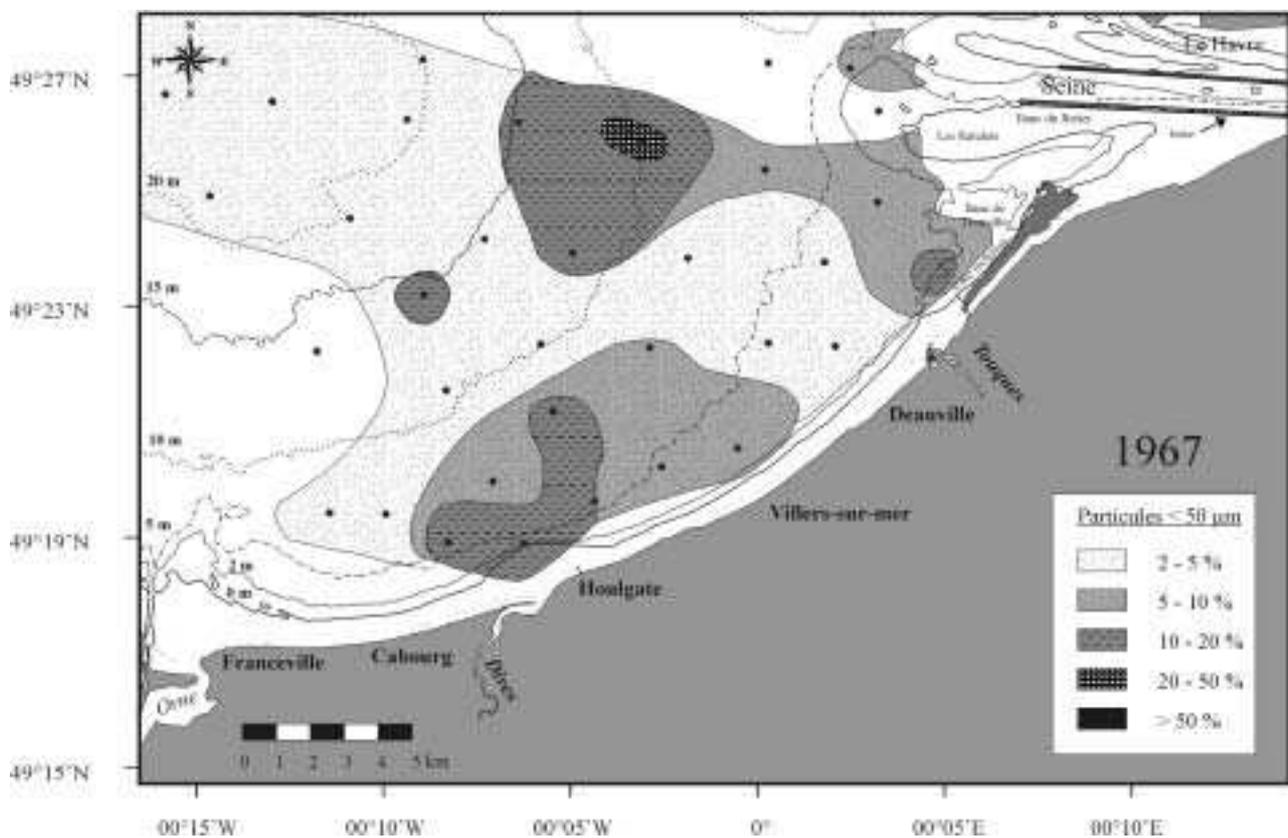
La répartition des fractions fines présentée sous la forme de trois cartes datant respectivement de 1967, 1977 et 2000 (*figs. II-9, II-10 et II-13*) correspond à des situations "moyennes" annuelles. Les deux dernières cartes ont été obtenues à partir d'échantillonnages réalisés en plusieurs temps au cours de la même année, mêlant ainsi les possibles variations saisonnières de la couverture sédimentaire.

#### **3.1 Situation décrite en 1967**

La carte des faciès sédimentaires de 1967 est la première carte publiée en Baie de Seine orientale (Larsonneur & Hommeril, 1967). Elle résulte de moyens de prélèvements modernes depuis l'utilisation du plomb suiffé (carte de 1913). L'utilisation d'outils de dragages pour ces

prélèvements sédimentaires était cependant mal adaptée à ce secteur de la Baie de Seine puisque les dragues conservent mal les fractions fines présentes au sein des sédiments. Malgré le peu d'échantillonnages réalisés à l'époque dans le secteur d'étude (33 points seulement), les zones d'envasement observées décrivent assez bien la nature des fonds à l'époque (Larsonneur, communication personnelle). Ce sont les sédiments sableux qui dominent dans les faibles profondeurs de la baie (*fig. II-9*): les sédiments superficiels sableux contenant moins de 5% de fraction fine couvrent plus de 75% du secteur (280 km<sup>2</sup>). Les sables vaseux et les vases sableuses se répartissent sur trois principaux sites d'accumulation:

- 1) au large de Cabourg et d'Houlgate entre le domaine intertidal et -10 m CM (50 km<sup>2</sup>),
- 2) au droit de l'estuaire de la Seine par -10 à -15 m CM,
- 3) entre le banc du Ratier et Deauville.

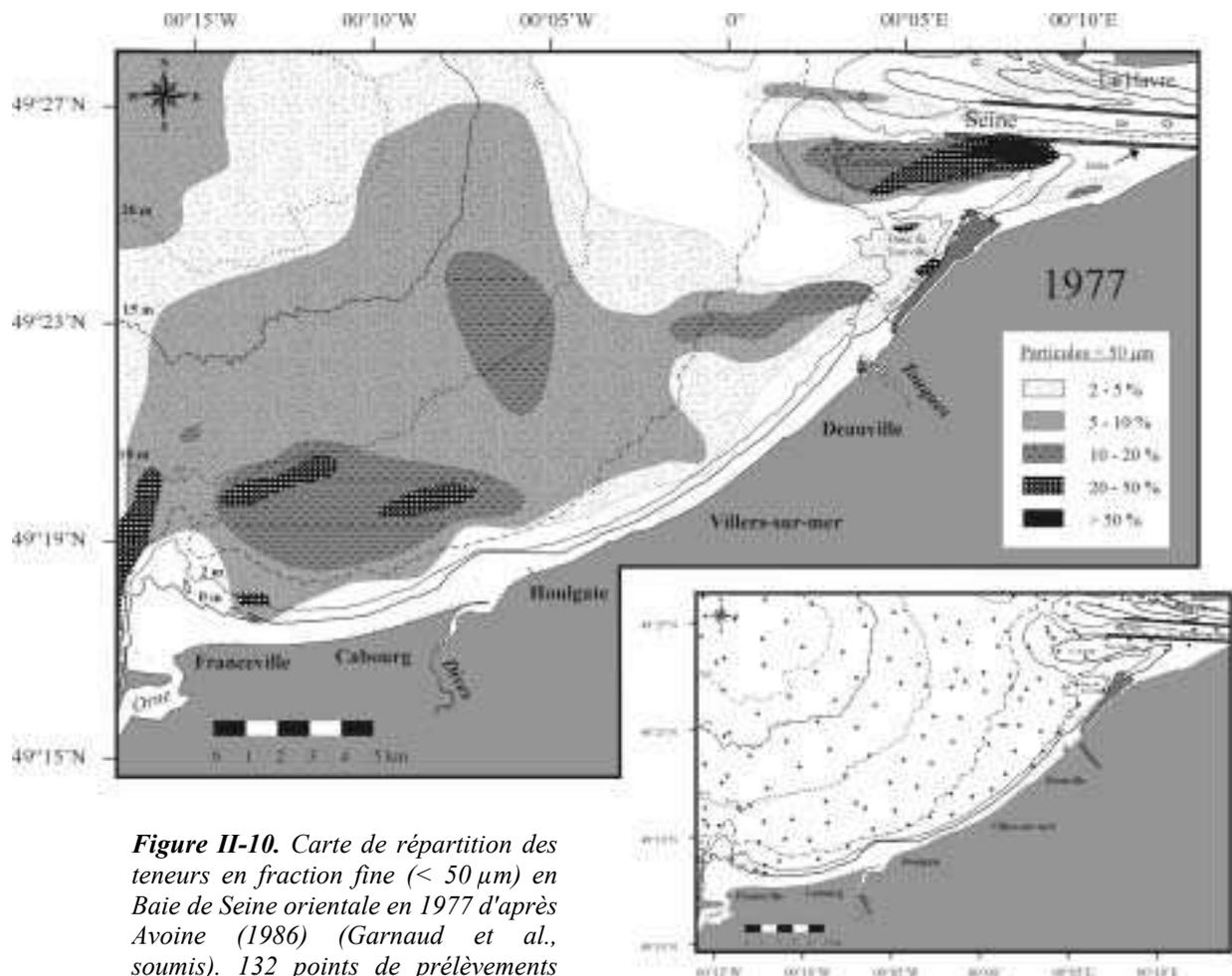


**Figure II-9.** Carte de répartition de la teneur en fraction fine (< 50 µm) en Baie de Seine orientale, en 1967 (Garnaud et al., soumis). Extrait de la carte originale établie par Larsonneur et Hommeril (1967) puis publiée par le BRGM dans la carte de synthèse des sédiments superficiels de la Manche (Vaslet et al., 1978); prélèvements réalisés au mois de mai 1967. Bathymétrie de la carte marine du SHOM 6328. • points de prélèvements.

### 3.2 Situation décrite en 1977

#### 3.2.1 Couverture sédimentaire superficielle

En 1977, les zones de sédimentation fine se sont très largement étendues sur l'ensemble de la Baie de Seine sud-orientale (*fig. II-10*, 132 points de prélèvements, d'après Avoine, 1981; Avoine, 1986). Ce sont les sédiments contenant 5-10% de fraction fine qui sont les mieux représentés, ils occupent 51% de la superficie soit 120 km<sup>2</sup>. Les secteurs envasés (> 10% de particules < 50 µm) se répartissent sur des aires de dépôts assez similaires à celles de 1967, avec cependant l'apparition d'une zone fortement envasée au niveau du banc du Ratier.

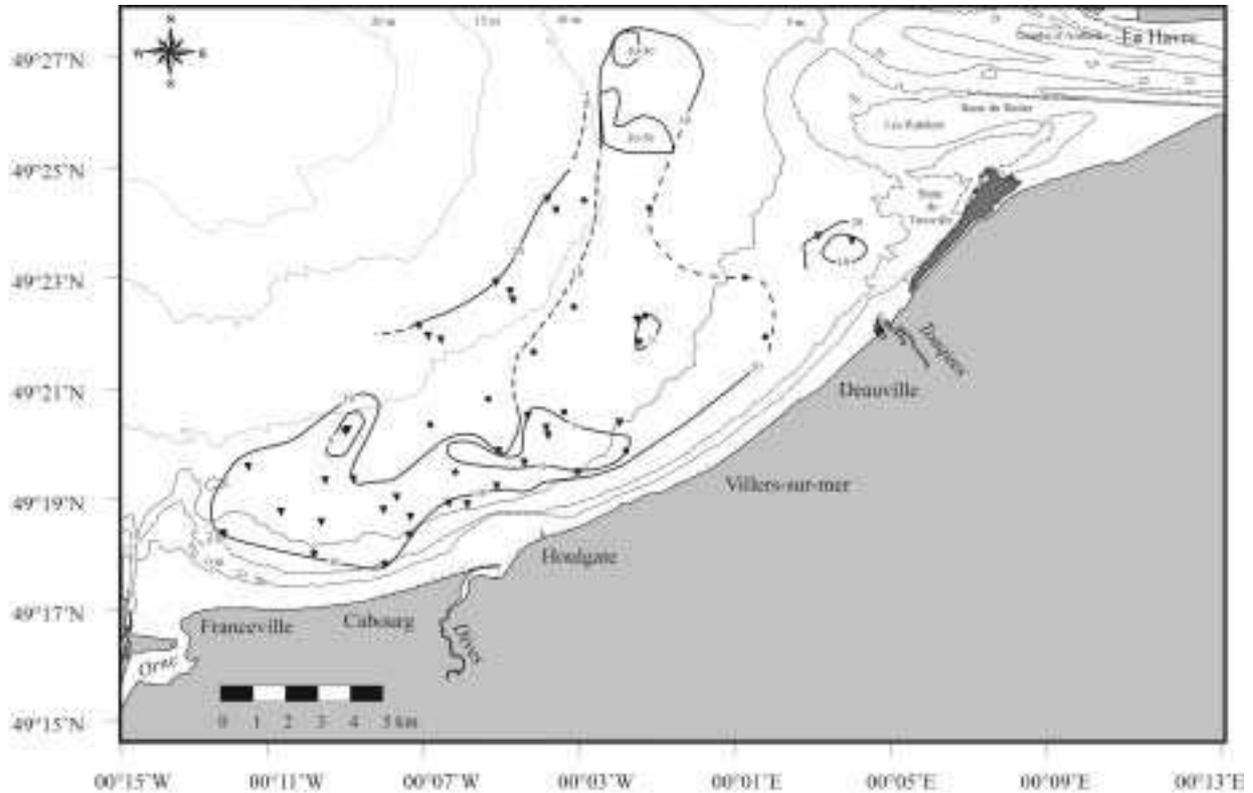


**Figure II-10.** Carte de répartition des teneurs en fraction fine (< 50 µm) en Baie de Seine orientale en 1977 d'après Avoine (1986) (Garnaud et al., soumis). 132 points de prélèvements réalisés entre août et septembre 1977. Bathymétrie de la carte marine du SHOM 6328.

#### 3.2.2 Argiles reliques dans les fonds marins subtidaux au large de Cabourg

Les premières observations de sédiments reliques au large du littoral du Calvados et de l'embouchure de la Dives datent de 1977. A partir d'une compilation de données de carottages courts et de prélèvements à la benne, Avoine (1981; 1994) montre que des sédiments reliques se

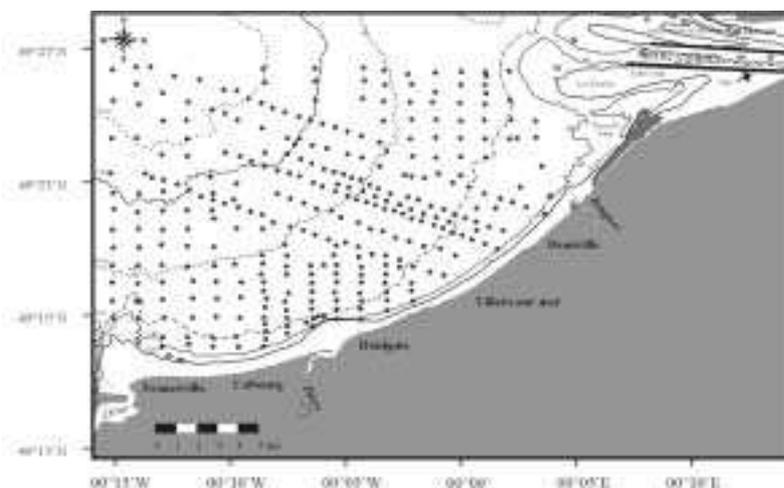
rencontrent entre Cabourg et Villers-sur-Mer soit en position subaffleurante soit sous un faible recouvrement de sable actuel (*fig. II-11*). Ces sédiments feront l'objet d'une première discussion dans le chapitre III de ce manuscrit suite à la reconnaissance des fonds subtidaux pour sonar à balayage latéral, et seront étudiés dans le chapitre IV.



**Figure II-11.** Epaisseur de la couverture meuble superficielle en centimètres d'après les données de carottage (triangles) et de bennes (points) effectués de 1977 à 1982 (Larsonneur & Avoine, 1981).

### 3.3 Situation actuelle: données VASTEDEBA 2000

La compilation de 2 missions effectuées en février et juin 2000 (VASTEDEBA I et II) permet de proposer la carte récente la plus complète de la répartition des sédiments fins. Du fait



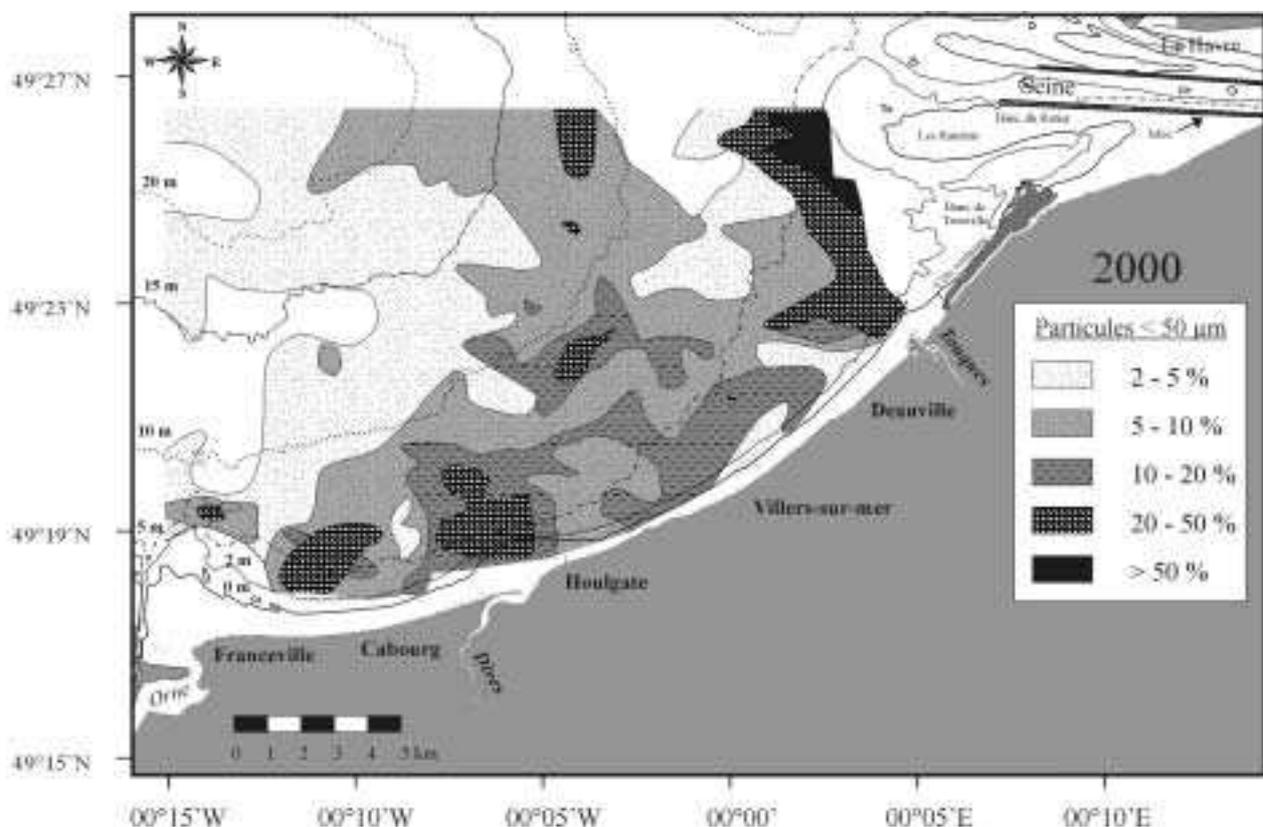
des nombreux prélèvements (450 points, *fig. II-12*), les limites des teneurs en fraction fine contenues dans les sédiments superficiels (*fig. II-13*) ont pu être tracées très précisément.

**Figure II-12.** Carte des stations de prélèvements des missions VASTEDEBA I et II dans la partie sud-orientale de la Baie de Seine.

L'association des données de ces 2 missions d'échantillonnage permet de couvrir la totalité de la Baie de Seine sud-orientale et se justifie par la courte durée de 4 mois qui sépare ces missions de prélèvements. De plus, les prélèvements de juin 2000 concernent les zones les plus profondes, moins sensibles aux fluctuations saisonnières de la couverture sédimentaire (*cf.* chapitre III).

Les zones envasées se limitent aux fonds marins compris entre 0 et -10 m CM (*fig.* II-13). Les sables fins envasés s'étendent le long de la côte du Calvados et se raccordent à ceux de l'embouchure de la Seine par l'intermédiaire des Ratelets, du banc du Ratier. Quatre zones de sédimentation fine se distinguent clairement:

- (1) au droit de l'embouchure de la Dives, secteur d'envasement pérenne connu depuis les années 1910 (Thoulet, 1908-1909; Sudry, 1911),
- (2) la partie frontale du banc du Ratier à l'embouchure de l'estuaire de la Seine,
- (3) le dépôt de dragage de Ouistreham,
- (4) et la vasière subtidale au large de Villers-sur-Mer qui montre, grâce à un échantillonnage rapproché, une subdivision en deux parties, l'une subtidale ("vasière subtidale") localisée vers -8 m CM et l'autre littorale ("vasière littorale") située entre le 0 et -5 m CM.



**Figure II-13.** Carte de la répartition de la fraction fine contenue dans les sédiments de la Baie de Seine sud-orientale en 2000 (Garnaud et al., soumis). 450 points de prélèvements. Bathymétrie de la carte marine du SHOM 6328.

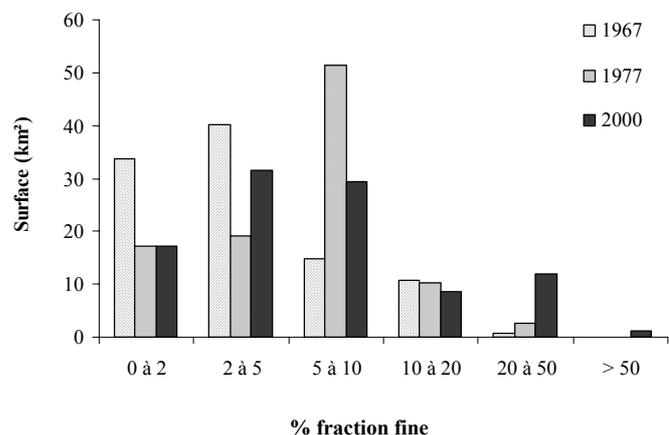
### 3.4 Bilan: évolution spatio-temporelle de la couverture sédimentaire de la Baie de Seine orientale depuis 30 ans

La comparaison des trois cartes (figs. II-9, II-10 et II-13) de la répartition des sédiments fins met en évidence une évolution notable des fonds marins subtidiaux au cours des trente dernières années. La couverture sédimentaire est passée d'une dominante sableuse en 1967 à des fonds où les fractions fines se sont étendues en 1977, puis encore en 2000. L'extension des sables envasés contenant plus de 20% de fraction fine a été multipliée par 5 en un peu plus de 20 ans: 6 km<sup>2</sup> en 1977 et 31 km<sup>2</sup> en 2000 (fig. II-14 et tabl. II-1). Le tableau II-1 récapitule pour chaque valeur d'intervalle d'envasement les surfaces concernées (aires et pourcentages de la zone concernée) ainsi que le pourcentage moyen de fraction fine en Baie de Seine orientale calculé pour chaque situation.

Distribution de la fraction fine (< 50 µm) contenue dans les sédiments superficiels	1967		1977		2000	
	Aire de répartition (km <sup>2</sup> )	Pourcentage	Aire de répartition (km <sup>2</sup> )	Pourcentage	Aire de répartition (km <sup>2</sup> )	Pourcentage
0 à 2 %	79	33,7	40	17,1	40	17,1
2 à 5 %	94	40,1	45	19,2	74	36,1
5 à 10 %	35	14,9	120	51,3	69	29,5
10 à 20 %	25	10,7	24	10,3	20	8,5
20 à 50 %	1,5	0,6	6	2,6	28	12
> 50 %	0	0	0	0	3	1,3
<b>Pourcentage moyen de fraction fine en Baie de Seine orientale</b>	4,7		7,1		10	

**Tableau II-1.** Evolution de la distribution des sédiments fins (< 50 µm) en Baie de Seine orientale entre 1967 et 2000 (Garnaud et al., soumis). Dans le calcul des aires de répartition, la même coupure géographique a été choisie, en éliminant ainsi les échantillons de la zone de l'embouchure de la Seine cartographiée en 1967 qui auraient faussé les comparaisons.

**Figure II-14.** Histogramme des surfaces envasées en fonction de leurs teneurs en fraction fine en Baie de Seine sud-orientale entre 1967, 1977 et 2000 (Garnaud et al., soumis).



D'après les données cartographiques disponibles, cette partie de la Baie de Seine montre un envasement croissant: le pourcentage moyen de fraction fine augmente de 4,7% (1967) à 7,1% (1977) puis 10% (2000) (*tabl. II-1*). L'incertitude sur les valeurs des données les plus anciennes est impossible à évaluer. Il faut également préciser que le secteur au large de Cabourg est constamment envasé depuis les années 1910, avec des teneurs en fraction fine qui évoluent mais qui restent géographiquement positionnées au même endroit. La reconnaissance d'argiles reliques subaffleurantes par Avoine (Avoine, 1981; Avoine, 1986; Avoine, 1994) dans ces mêmes profondeurs suggère un lien de cause à effet avec la présence de sédiments fins sur ce site. Une investigation complète de ces dépôts a été réalisée lors de nos missions (VASTEDEBA) par l'utilisation conjointe de l'imagerie acoustique (sonar à balayage latéral) et de carottages (Küllenberget vibrocarottier). Les résultats sont présentés en chapitres III et IV.

L'envasement de l'embouchure de l'estuaire de la Seine est particulièrement marqué depuis les 20 dernières années (Avoine, 1986; Lesourd, 2000; Lesourd *et al.*, 2001). Les cartes les plus récentes, présentées dans ce travail (1977 et 2000), montre que cette tendance à l'envasement est également constatée dans la partie adjacente sud-orientale de la Baie de Seine.

#### 4. Synthèse de l'évolution des fonds sédimentaires au cours des deux derniers siècles

Les données sédimentologiques anciennes du XIX<sup>ème</sup> siècle comparées aux cartes actuelles font apparaître que les fonds marins de la Baie de Seine sud-orientale ont évolué avec les modifications naturelles (divagation des chenaux, remplissage) et anthropiques (aménagements) de l'estuaire jusqu'à nos jours. La couverture sédimentaire composée essentiellement de sables au début du XIX<sup>ème</sup> siècle a évolué vers une composante vaseuse entre la période 1880-1894 puis sableuse en 1913-1967, pour finir enfin sur l'évolution que nous connaissons depuis ces 20 dernières années, c'est à dire une sédimentation sablo-vaseuse et vaseuse.

L'envasement important constaté en 1880-1894 peut apparaître comme la résultante des premiers aménagements dans l'estuaire aval, ayant alors déplacé la zone de sédimentation fine plus vers l'embouchure. Toutefois, les travaux anciens sur ce propos ne sont pas unanimes et mettent aussi en avant une évolution naturelle du système dans un contexte où les conditions hydrologiques au cours de ces années étaient très favorables aux déplacements des stocks sédimentaires à l'intérieur de l'estuaire (houles et crues). Le retour à une dominante sableuse du domaine subtidal en 1913 est imputée aux aménagements de l'embouchure de la Seine réalisés entre 1895 et 1920. La construction d'une digue insubmersible a entraîné le déplacement plus en aval de la sédimentation sableuse et le piégeage latéral amont, en arrière des digues, des sédiments fins.

En 1967, la situation des fonds sédimentaires s'inscrit dans le même schéma que celui de 1913 où la fraction sableuse domine largement en Baie de Seine sud-orientale. Par contre, dès

1977, on observe une nette augmentation des aires de dépôts de fraction fine en domaine subtidal. Cet accroissement, déjà décrit dans le secteur estuarien (Lesourd *et al.*, 2001), est contemporain des derniers endiguements de l'estuaire aval de la Seine. De nos jours, le développement des surfaces très envasées s'est encore accrue.

## Bibliographie du chapitre II

- Avoine, J.** (1981). L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 236 p.
- Avoine, J.** (1986). Sediment exchanges between the Seine estuary and its adjacent shelf. *Journal of the Geological Society, London* 144, 135-148.
- Avoine, J.** (1994). Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. *Rapport d'étude, IFREMER - Port autonome du Havre, Brest*, 153 p.
- Gabeloteau, I.** (1994). Validité et utilisation des données sédimentologiques anciennes obtenue à l'aide du plomb suiffé. *INTECHMER/EPHOM*, 68 p.
- Garlan, T.** (1995a). Caractérisation des fonds et des sédiments sous-jacents du plateau continental au domaine océanique. *Revue Scientifique et Technique de la Défense* 2, 169-172.
- Garlan, T.** (1995b). La cartographie des sédiments du littoral français. Résultats et objectifs. *Journal de la Recherche Océanographique* 20 (1-2), 50-54.
- Garnaud, S.** (1998). Réalisation de la carte sédimentologique 6333G "De l'île de Ré à l'île d'Oléron". Rapport final. *EPHOM*, Brest, 16 p.
- Garnaud, S.** (2002). Carte sédimentologique de la Pointe du Cou à la Pointe de Chassiron (Pertuis Breton et Charentais) 7404G. SHOM.
- Garnaud, S. & Garlan, T.** (1998). Dynamique sédimentaire du pertuis d'Antioche (Charente-Maritime). La carte sédimentologique 6333G du SHOM. *17<sup>ème</sup> Réunion des Sciences de la Terre*, Brest, 31 mars au 3 avril 1998, 118-119.
- Garnaud, S., Lesueur, P., Lesourd, S., Garlan, T., Clet, M. & Brun-Cottan, J.-C.** (soumis). Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner shelf (eastern Bay of the Seine, France). *Marine Geology*.
- Laignel, B.** (1991). Etude des sédiments superficiels aux abords du Havre. *Mémoire de maîtrise de l'Université de Caen*, 56 p.
- Larsonneur, C.** (1964). Petite drague pour fonds meubles et peu profonds. *Bulletin de la Société Linnéenne de Normandie* 5 (10), 94-96.
- Larsonneur, C.** (1971). Manche centrale et Baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles, *Thèse d'Etat de l'Université de Caen*, 394 p.
- Larsonneur, C. & Hommeril, P.** (1967). Sédiments et sédimentation dans la partie orientale de la Baie de Seine. *Extrait de la revue des sociétés savantes de Hautes-Normandie* 47, 45-75.
- Larsonneur, C. & Avoine, J.** (1981). Détermination des flux de matières en suspension en Baie de Seine. Contrat IFREMER 81/6559. *Contrat IFREMER 81/6559, Laboratoire de géologie marine, Université de Caen*, 45 p.
- Larsonneur, C., Bouysse, P. & Auffret, J.-P.** (1982). The superficial sediments of the English Channel and its Western Approaches. *Sedimentology* 29, 851-864.
- Lavoine, E.** (1885). La Seine maritime et son estuaire. Encyclopédie des travaux publics. *Baudry et C<sup>ie</sup> & Leroux, E. (Editeurs)*, 311 p.
- Lennier, G.** (1885). L'estuaire de la Seine. Mémoires, notes et documents pour servir à l'étude de l'estuaire de la Seine, 2 vol. et 1 atlas. *Hustin imprimerie, Le Havre*.
- Lesourd, S.** (2000). Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal: zoom temporel du siècle à l'heure; application à l'estuaire de la Seine. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 280 p.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Auffret, J.P., Poupinet, N. & Laignel, B.** (2001). Morphosedimentary evolution of a macrotidal estuary subjected to human impact; the example of the Seine (France). *Estuaries* 24 (6B), 940-949.
- Lesueur, P. & Lesourd, S.** (1999). Sables, chenaux, vasières. Dynamique des sédiments et évolution morphologique. Programme scientifique Seine-Aval, 3. *IFREMER*, 39 p.

- Sudry, M.L.** (1911). Les sédiments marins des côtes du Calvados. *Comptes rendus du congrès des sociétés savantes de Paris et des départements*. Imprimerie Nationale, Caen, 25-32.
- Thoulet** (1908-1909). Etude des fonds marins de la Baie de Seine. *Annales hydrographiques*, 1-28.
- Vaslet, D., Larsonneur, C. & Auffret, J.-P.** (1978). Carte des sédiments superficiels de la Manche au 1:500 000<sup>e</sup> et notice explicative. B.R.G.M, Orléans, 17 p.
- Vigarié, A.** (1964). Etude critique de la documentation sur l'évolution morphologique de l'estuaire de la Seine, *Thèse d'Etat de l'Université de Paris*, Paris, 380 p.

# Chapitre III

---

## Couverture sédimentaire actuelle de la Baie de Seine orientale : cartographie et caractéristiques des variations lithologiques saisonnières et pluri-annuelles

<b>1. Introduction</b> .....	<b>85</b>
<b>2. Stratégie d'échantillonnage et missions en mer</b> .....	<b>86</b>
2.1 Situation de la zone atelier et justification de ce choix .....	86
2.2 Stratégie d'échantillonnage .....	88
<b>3. Caractéristiques sédimentaires de la Baie de Seine sud-orientale en 2000 et 2001</b> .....	<b>89</b>
3.1 Répartition des faciès sédimentaires .....	91
3.1.1 Taux de carbonates .....	91
3.1.2 Répartition des paramètres granulométriques .....	91
3.1.3 Etudes des figures sédimentaires (prospection au sonar à balayage latéral) .....	96
3.2 Secteurs envasés de la Baie de Seine orientale .....	115
3.2.1 Situation en février-mars 2000 .....	115
3.2.2 Situation en juin 2001 .....	115
3.2.3 Caractéristiques des zones envasées .....	117
<b>4. Suivi saisonnier de l'évolution de l'envasement de la couverture sédimentaire en Baie de Seine sud-orientale</b> .....	<b>122</b>
4.1 Rappels des connaissances antérieures: variations saisonnières des sédiments fins en 1981-1982 .....	122
4.1.1 Résultats .....	122
4.1.2 Commentaires .....	124
4.2 Données nouvelles sur la couverture sédimentaire (Programme PNEC Baie de Seine et Seine-aval II): variations saisonnières et pluri-annuelles sur la zone atelier .....	125
4.2.1 Variations pluriannuelles constatées entre 1995 et 2001 .....	125
4.2.2 Variations saisonnières et pluri-annuelles: la zone atelier des radiales FLUXMANCHE .....	126
4.2.3 Evolution spatio-temporelle de la vase temporaire subtidale sur la zone atelier .....	128
4.2.4 Informations apportées par l'imagerie sous-marine .....	133
4.2.5 Bilan des variations de l'envasement à l'échelle saisonnière .....	134
4.3 Fluctuations de l'envasement en d'autres secteurs du système estuarien-Baie de Seine .....	138
4.3.1 Répartition des sédiments fins dans l'embouchure de la Seine .....	138
4.3.2 L'envasement du secteur atelier de la Baie de Seine nord-orientale (fonds au large du cap d'Antifer) .....	138
4.4 Synthèse: tendances saisonnières des envasements dans le système embouchure de la Seine - Baie de Seine orientale .....	141
<b>5. Transport sédimentaire résiduel en Baie de Seine sud-orientale : méthode de Gao et Collins et confrontation avec les données <i>in situ</i></b> .....	<b>142</b>
5.1 Domaines d'application et fraction sédimentaire concernée .....	142
5.2 Transports sédimentaires résiduels saisonniers en Baie de Seine sud-orientale selon la méthode de Gao et Collins .....	144

5.2.1 Directions et sens de transport calculés par la méthode en période hivernale (février 2000) .....	144
5.2.2 Directions et sens de transport calculés par la méthode en période estivale (juin 2001) .....	150
5.3 Confrontation des résultats de la méthode de Gao et Collins et des observations <i>in situ</i> .....	150
5.4 Synthèse: les transports sédimentaires à l'échelle saisonnière en Baie de Seine orientale d'après la méthode de Gao et Collins .....	155
<b>6. Origine des sédiments fins en Baie de Seine sud-orientale .....</b>	<b>159</b>
6.1 Sources de matériel sédimentaire fin dans la zone d'étude : bilan des connaissances .....	159
6.1.1 Flux particuliers d'origine continentale.....	159
6.1.2 Flux particuliers d'origine marine .....	163
6.2 Sources de matériel sédimentaire fin dans la zone d'étude: nouvelles données.....	165
6.2.1 Erosion des argiles fossiles au large de Cabourg.....	165
6.2.2 Nouveaux marqueurs minéralogiques et géochimiques des sédiments fins (silts et argiles).....	167
6.2.3 Synthèse : les sources de matériel fin en Baie de Seine orientale.....	175
<b>7. Les sédiments fins d'origine fluviale apportés par les crues de la Seine dans le domaine sud-oriental.....</b>	<b>178</b>
7.1 Introduction .....	178
7.1.1 La sédimentation fine identifiée comme le produit des épisodes de crues fluviales sur les plates-formes continentales actuelles .....	178
7.1.2 Les crues océaniques ( <i>Oceanic flood</i> ) .....	179
7.2 Distribution de sédiments fins issus des apports de crue en Baie de Seine .....	181
7.2.1 Historique des crues de Seine.....	181
7.2.2 Evolution des crues de la Seine depuis 1941 .....	182
7.3 Campagnes de mesures hydrosédimentaires en point fixe au large de Villers-sur-Mer .....	183
7.3.1 Mesures en conditions d'étiage de la Seine.....	184
7.3.2 Mesures en conditions de crue de la Seine .....	186
7.3.3 Synthèse: caractéristiques hydrosédimentaires et courantologiques sur le site du point fixe .....	192
7.4 Impacts de crues hivernales sur la Baie de Seine sud-orientale (1998-2001).....	196
7.4.1 Analyse de la crue hivernale de 1998-1999.....	196
7.4.2 Commentaires sur la masse de sédiments fins déposée sur la vaseuse subtidale en mars 1999.....	197
<b>8. Conclusions .....</b>	<b>200</b>
8.1 Couverture sédimentaire et formes associées .....	200
8.2 Sources de sédiments fins.....	201
8.3 Transports sédimentaires .....	201
8.4 Mesures hydrosédimentaires et "crues estuariennes" .....	202
8.5 La Baie de Seine orientale, une zone d'envasement en continue évolution .....	203

## Chapitre III

---

# Couverture sédimentaire actuelle de la Baie de Seine orientale : cartographie et caractéristiques des variations lithologiques saisonnières et pluri-annuelles

### 1. Introduction

Les dépôts meubles de la partie orientale de la Baie de Seine montrent des variations importantes tout au long de l'année qui traduisent d'une part la mobilité de la fraction sablo-vaseuse sous l'action de courants de marée et des houles et, d'autre part, les fluctuations des différents apports en sédiments pélitiques à des échelles de temps très différentes (Avoine *et al.*, 1984a).

Au cours de nos missions, un échantillonnage intensif de plus de 1100 prélèvements réalisés, et une prospection acoustique par sonar à balayage latéral ont permis (i) d'actualiser nos connaissances sur la répartition actuelle des sédiments fins des fonds marins subtidaux en Baie de Seine orientale, (ii) de cartographier les différentes figures sédimentaires et de les interpréter en terme de dynamique et d'évolution des fonds, (iii) de comparer ces nouvelles données avec celles acquises antérieurement avec des moyens de prélèvements analogues et (iiii) de caractériser la mobilité de la fraction pélitique à l'échelle saisonnière (court terme) et pluri-annuelle (moyen terme) dans le domaine sud-oriental de Baie de Seine. Une synthèse sur les variations saisonnières observées sur les secteurs adjacents de l'embouchure de la Seine et sur le domaine nord-oriental (secteur face à Antifer) sera aussi proposée (*cf.* § 4.4) afin de replacer notre site d'étude dans le contexte d'ensemble du système estuarien-Baie de Seine orientale.

L'ensemble des données acquises a également permis de déterminer les transports sédimentaires résiduels sur le fond à partir du modèle de Gao et Collins. Cette méthode a été appliquée sur des prélèvements réalisés au cours de deux saisons distinctes (hiver et été) dans la recherche d'indices de saisonnalité des sens de transports calculés (*cf.* § 5).

Du fait des multiples sources potentielles d'apport de sédiments fins dans la Baie de Seine sud-orientale, il nous a également paru important de préciser chacune de ces sources qui jouent un rôle actif dans les envasements à court (annuel) et moyen (pluri-annuel) terme (*cf.* § 6). Les crues de la Seine étant susceptibles de participer à l'apport de sédiments fins, les caractéristiques hydrologiques de la colonne d'eau ont été suivies en point fixe au cours

de différents débits de la Seine et coefficients de marée afin d'estimer l'impact de ces événements à occurrence surtout saisonnière (cf. § 7).

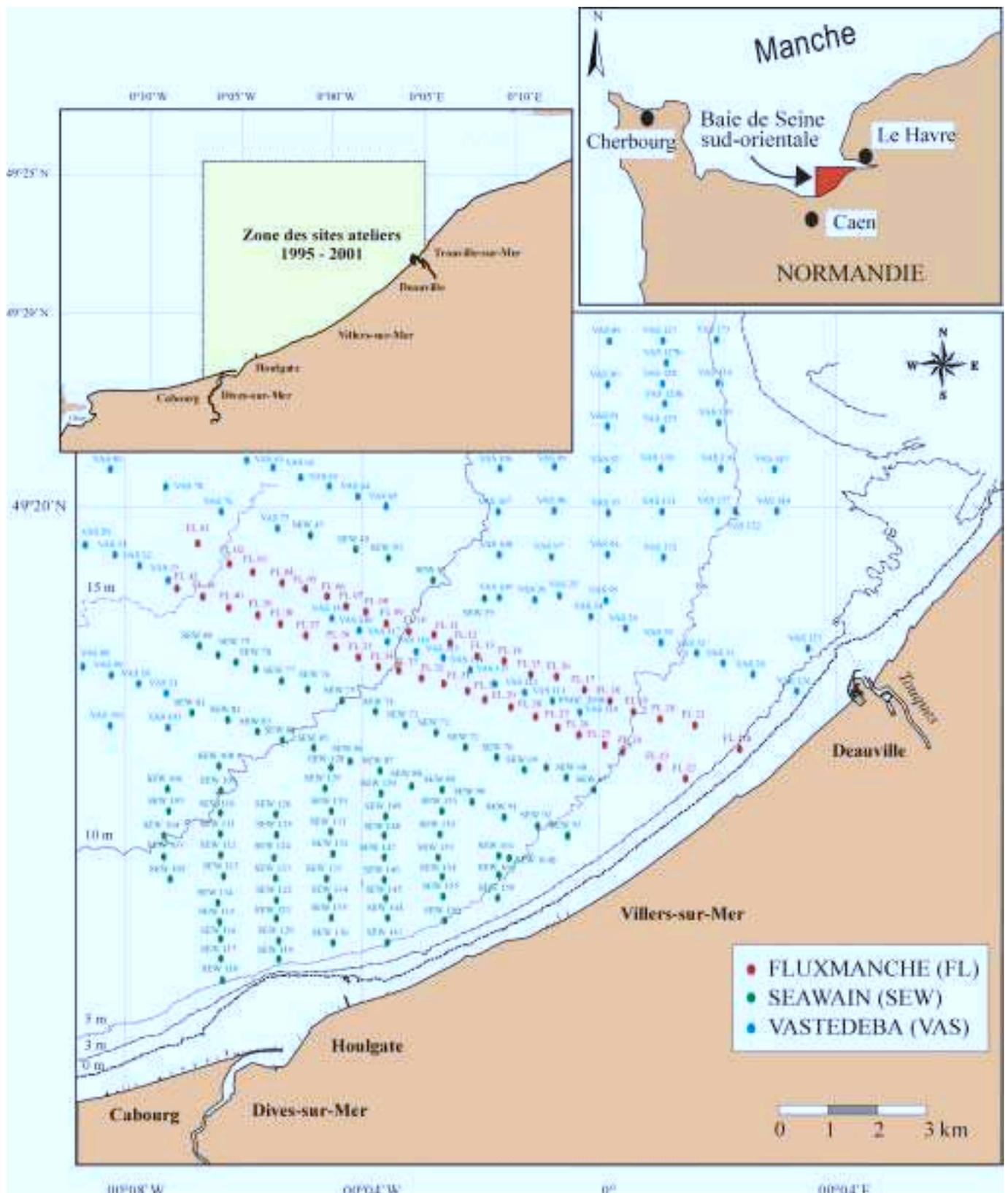
## 2. Stratégie d'échantillonnage et missions en mer

### 2.1 Situation de la zone atelier et justification de ce choix

Les travaux réalisés lors du SAUM (Schéma d'Aptitude pour l'Utilisation de la Mer) avaient fourni les premières informations sur les caractéristiques des variations saisonnières de la couverture sédimentaire en Baie de Seine orientale (SAUM, 1980; Avoine, 1981; Larsonneur & Avoine, 1981). Ainsi, ces travaux avaient montré que le secteur sujet aux plus fortes fluctuations se situe entre Cabourg et Deauville par des profondeurs de -4 m à -8 m CM. Depuis ces études, la reconnaissance des zones préférentielles de sédimentation fine n'a été relancée qu'au cours des campagnes du programme européen FLUXMANCHE (campagnes SEAWAIN) en 1995: après un nouvel échantillonnage du sédiment superficiel, deux radiales distantes d'un kilomètre, d'orientation WNW-ESE, avaient été choisies comme représentatives d'un secteur potentiellement propice au dépôt de sédiments fins (points annotés FL, *fig. III-1*). Ce sont ces même radiales qui ont été reprises dans la présente étude. Ces transects comprennent au total 40 stations de prélèvements espacées de 600 m entre les cotes -1 m et -16 m CM (*fig. III-1*). En même temps que les radiales furent initiées en 1995, le secteur situé plus à l'ouest a été prospecté avec un maillage régulier afin de déterminer l'extension des vases subtidales (points annotés SEW, *fig. III-1*). Pour cette étude, nous avons repris ces points d'échantillonnage et les avons complétés vers le nord et le large (points annotés VAS, *fig. III-1*).

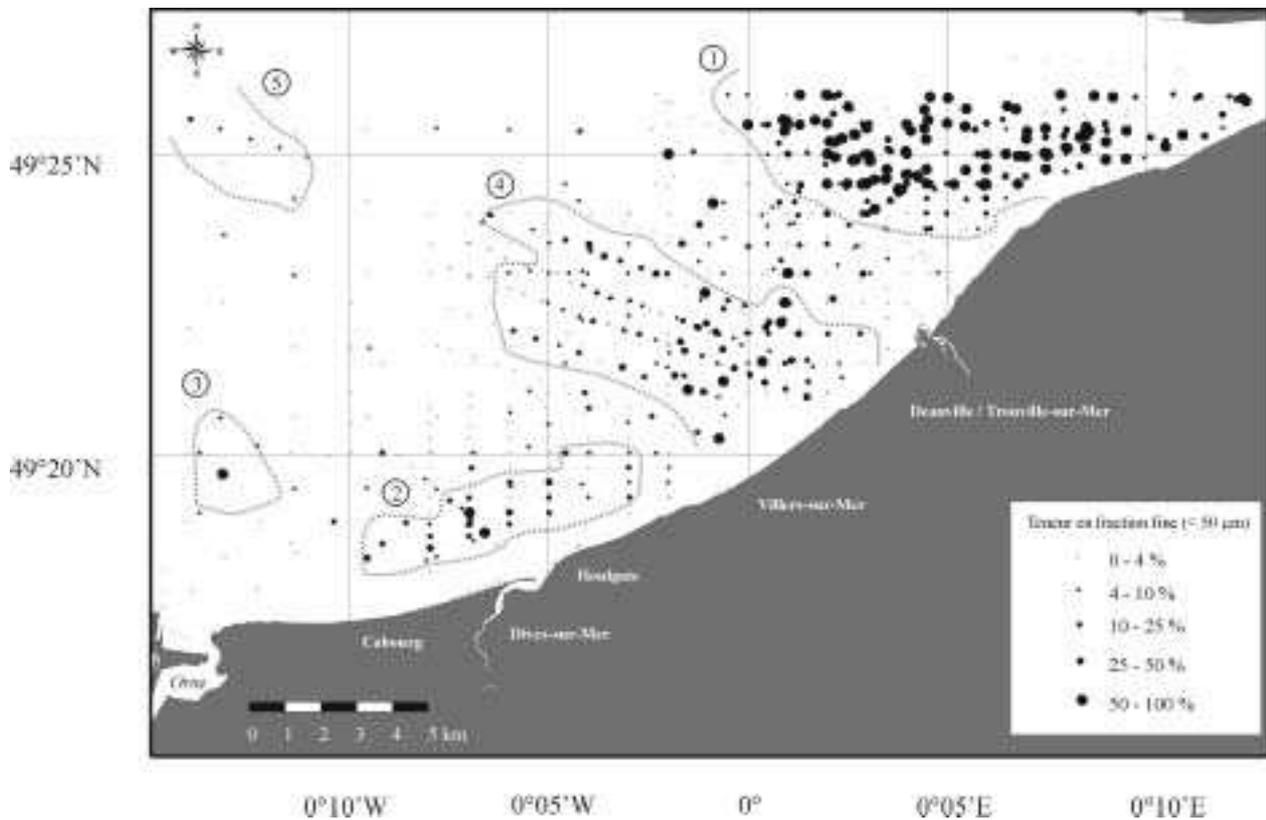
La compilation des données sédimentologiques récentes (1995-1999, avant les missions VASTEDEBA de 2000 et 2001) sur le secteur d'étude permet d'identifier les zones de dépôt de particules fines toutes conditions saisonnières confondues. Le terme de sédiment envasé est employé dans le cas d'une teneur en fraction fine ( $< 50 \mu\text{m}$ ) supérieure à 5% dans le sédiment total analysé. Sur la figure III-2, on note que les dépôts vaseux sont, quelle que soit la période de l'année, principalement localisés au niveau:

- ① du banc du Ratier,
- ② au large de Cabourg,
- ③ du dépôt de dragage de Ouistreham,
- ④ au large de Villers-sur-Mer et Deauville,
- ⑤ au Parfond, pour une moindre part.



**Figure III-1.** Position des stations de prélèvements réalisés au cours des missions FLUXMANCHE, SEAWAIN et VASTEDEBA. L'ensemble des stations a été échantillonné en 2000 et 2001. En rouge: radiales FLUXMANCHE initiées en 1995; en vert: stations initiales définies lors des missions SEAWAIN en 1995; en bleu: nouveaux points de prélèvements permettant de compléter le maillage d'échantillonnage de la couverture sédimentaire et de prolonger les transects existants vers le large.

Cette carte (fig. III-2) permet aussi de montrer la présence d'un dépôt vaseux individualisé dans les petits fonds entre Villers-sur-Mer et Deauville ④, séparé à la fois du secteur de Cabourg ② et du banc du Ratier ①. Ce site de sédimentation fine servira de zone atelier pour notre étude à court et moyen terme de la variabilité spatio-temporelle des dépôts en particules fines (fig. III-2).



**Figure III-2.** Compilation des données du pourcentage des particules fines présentes dans les fonds de la Baie de Seine orientale entre 1995 et 1999. Localisation des dépôts préférentiels de vase: ① du banc du Ratier, ② au large de Cabourg, ③ à proximité immédiate du dépôt de dragage de Ouistreham, ④ au large de Villers-sur-Mer et Deauville (zone atelier) et ⑤ le Parfond.

## 2.2 Stratégie d'échantillonnage

Les campagnes VASTEDEBA ont permis d'actualiser nos connaissances sur l'évolution des dépôts fins en Baie de Seine orientale aux échelles de temps pluri-annuelles (entre 1995 et 2001) et saisonnières, soit au printemps (mai 1999 et mai 2001), en été (septembre 1998, juin 2000 et juin 2001) et en hiver (mars 1999 et février 2000). Ces missions se sont déroulées dans le cadre des programmes nationaux PNEC "Baie de Seine" et Seine-Aval II entre 1998 et 2001. Afin de pouvoir comparer nos données à celles issues de prélèvements plus anciens, les points d'échantillonnage effectués depuis 1998 ont été localisés exactement aux mêmes positions qu'en 1995. Les prélèvements de 1995 servent ainsi de situation initiale pour notre étude de l'évolution des dépôts fins à l'échelle

pluri-annuelle. On peut également rappeler que la méthodologie utilisée a été rigoureusement la même, aussi bien dans le mode de prélèvement (Shipeck et Reineck) que de positionnement (DGPS<sup>1</sup>). Deux types de suivis ont été réalisés sur le secteur d'étude:

- sur le secteur atelier au large des côtes du Calvados (radiales dites FLUXMANCHE, 1995): suivi au pas de temps saisonnier depuis septembre 1998 par différentes conditions hydrodynamiques (*fig. III-3*). Il consiste à répéter l'échantillonnage des points de prélèvements régulièrement espacés de la côte vers le large sur des stations positionnées au DGPS le long des 2 transects. Les points ont été rééchantillonnés jusqu'à 9 fois depuis 1995. Ces radiales ont été prolongées vers le large lorsque les sédiments prélevés restaient encore envasés vers les profondeurs d'eau les plus importantes (*fig. III-1*). Ces prélèvements ont été complétés par des mesures hydrologiques en un point fixe situé à mi-distance sur l'une des deux radiales (les résultats de ces mesures seront présentés dans le paragraphe 7.3).

- un suivi sur l'ensemble du domaine subtidal compris entre Ouistreham et le banc du Ratier depuis le 0 CM jusqu'au Parfond (*fig. III-4*) pour une comparaison avec les cartes de répartition des sédiments fins publiées dans différents travaux (Avoine, 1981; Avoine *et al.*, 1984a; Avoine, 1986b; Avoine & Larsonneur, 1987; Avoine, 1994).

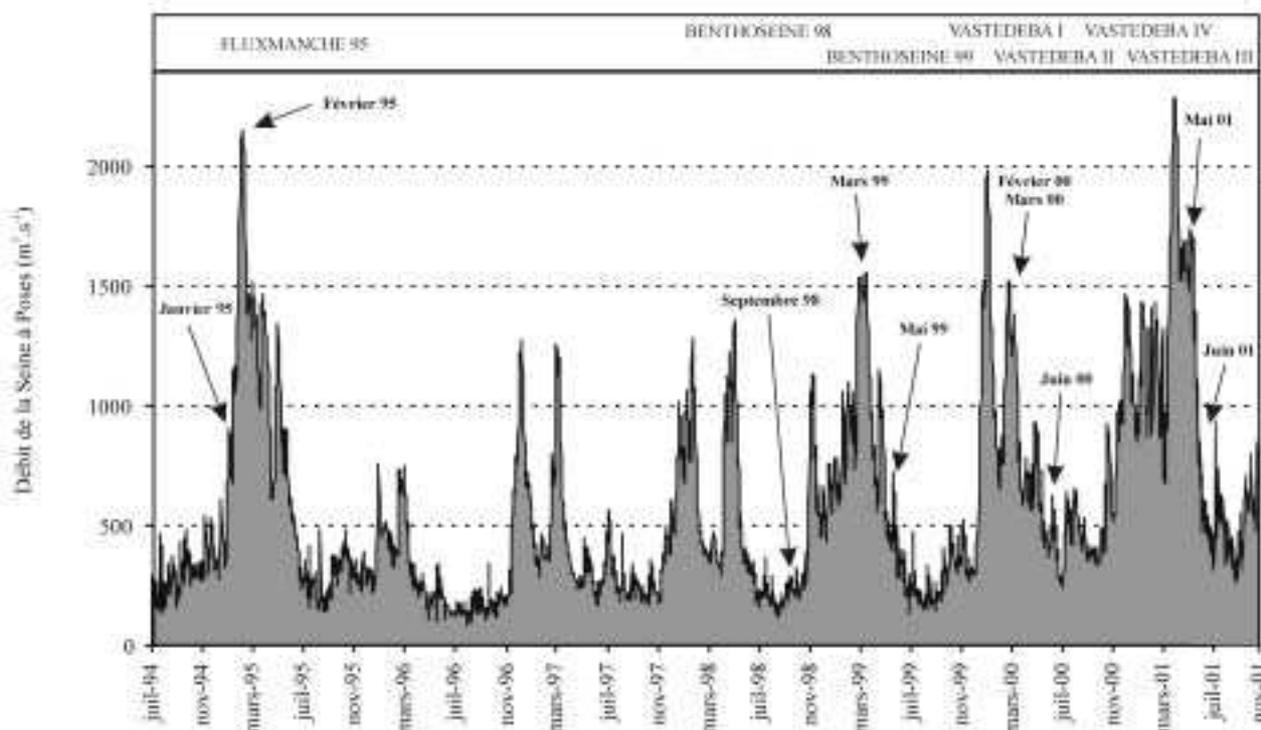
L'échantillonnage a d'abord été réalisé par benne Shipeck puis éventuellement par carottage Reineck quand les dépôts superficiels de vase étaient apparents. Les cartes de positionnement et les tableaux de tous les points d'échantillonnage réalisés au cours de différentes missions VASTEDEBA sont proposés en annexe 1 de ce manuscrit.

### 3. Caractéristiques sédimentaires de la Baie de Seine sud-orientale en 2000 et 2001

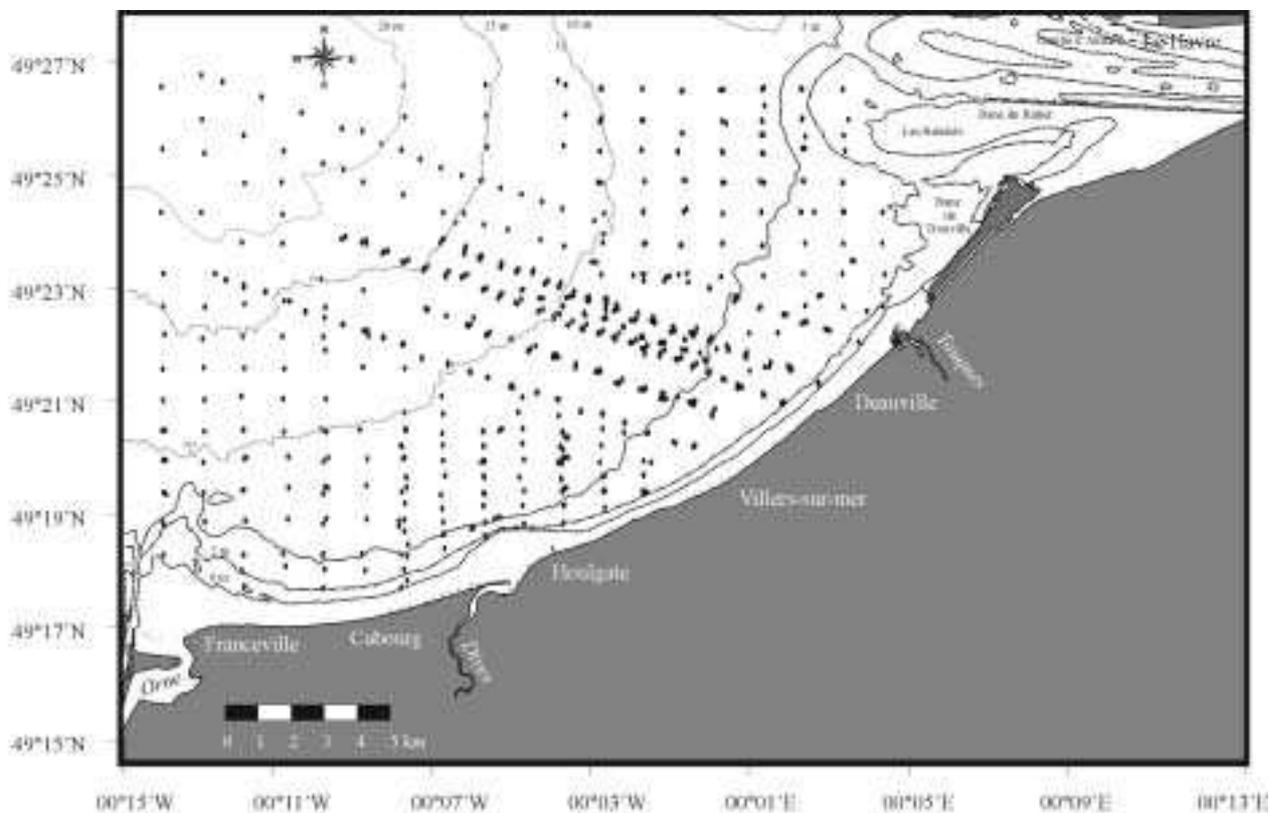
Les 4 campagnes VASTEDEBA réalisées en 2000 et 2001 ont permis de procéder à un échantillonnage complet de la couverture sédimentaire des fonds subtidaux de la Baie de Seine sud-orientale. Ces prélèvements ont servi à caractériser la nature de ces fonds par un ensemble d'analyses granulométriques et calcimétriques. L'utilisation du sonar à balayage latéral complète ces données en cartographiant en détail les différentes formes sédimentaires qui affectent ces fonds marins subtidaux.

---

<sup>1</sup> DGPS: Positionnement par satellites GPS (Global Positioning System) par rapport à un émetteur fixe permettant ainsi de corriger les erreurs en mode différentiel. DGPS utilisé lors des missions VASTEDEBA: Trimble GPS Pathfinder Pro XR, erreur de positionnement inférieure au mètre.



**Figure III-3.** Conditions hydrologiques de la Seine lors des missions en mer. Débits liquides mesurés au barrage de Poses (localisation: fig. In-3, p. 3; données: Service de navigation de la Seine, Port Autonome de Rouen).



**Figure III-4.** Localisation de l'ensemble des stations de prélèvement réalisées entre septembre 1998 et juin 2001 (environ 500 sites) en Baie de Seine sud-orientale. Un catalogue des données sédimentologiques acquises lors des différentes missions VASTEDEBA est proposé en annexe 1 avec le détail des différents types de prélèvements réalisés lors de chaque mission.

### 3.1 Répartition des faciès sédimentaires

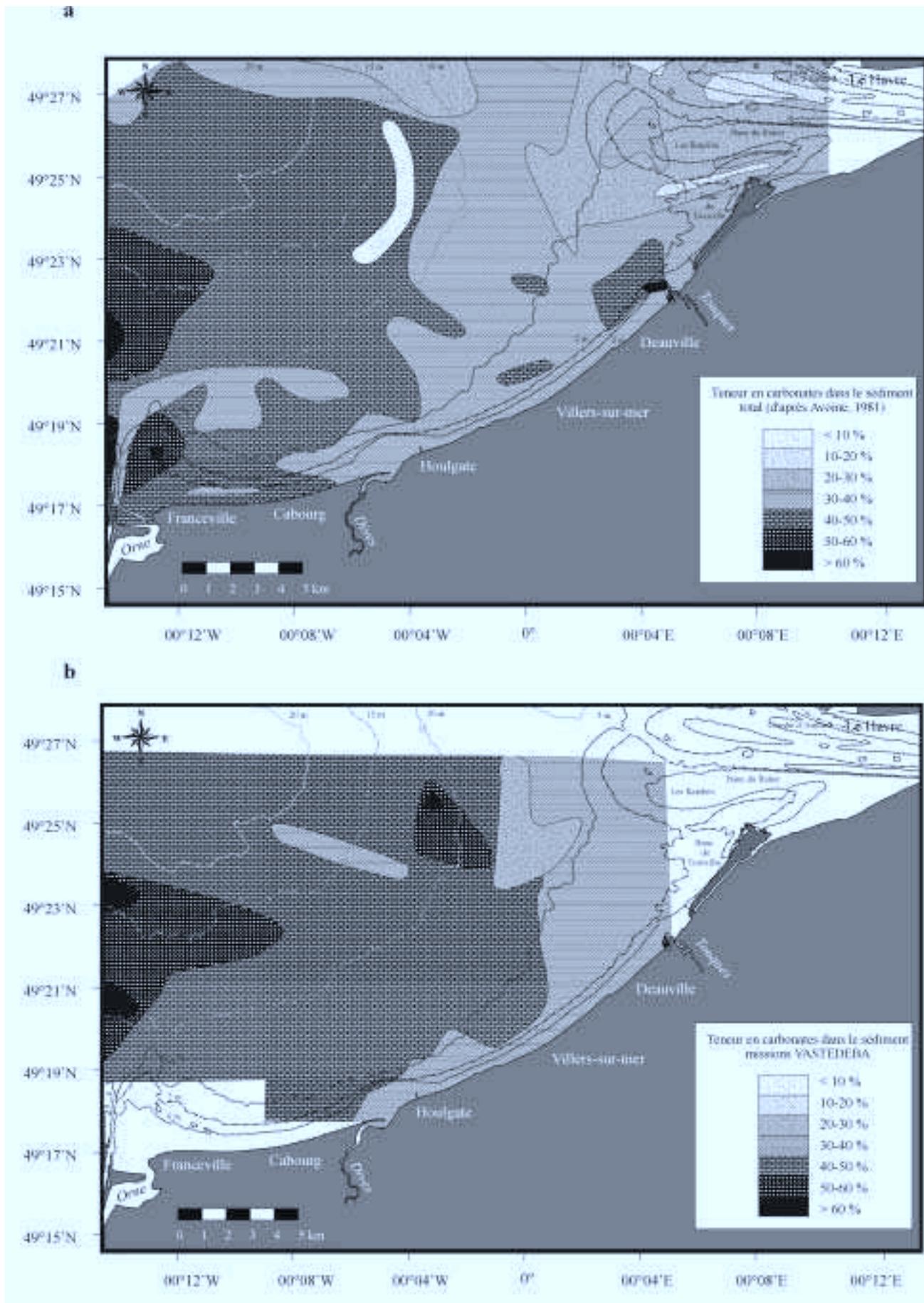
#### 3.1.1 Taux de carbonates

Larsonneur (1971) avait montré que l'origine des carbonates présents dans la composition des sédiments de la Manche centrale et de la Baie de Seine était essentiellement organogène. A partir des nouveaux échantillons prélevés, 60 analyses de teneur en carbonates ont été réalisées sur notre secteur d'étude. Ainsi, sur la nouvelle carte de répartition de la fraction carbonatée présentée, le secteur est dominé par des sédiments dont la teneur en carbonates est supérieure à 40% sur une superficie de plus de 80% du domaine d'étude (*fig. III-5*). Les teneurs peuvent atteindre localement 90 à 100% de calcaire, en domaine subtidal où apparaissent des sillons exclusivement constitués de coquilles brisées au large d'Houlgate (*cf. § 3.1.3.2*). La répartition des taux de carbonates est comparable à celle établie dans les années 1980 par Avoine (Avoine, 1981): les taux les plus forts sont atteints à l'extrémité ouest du secteur d'étude, les plus faibles se situent en direction de l'embouchure de la Seine (*fig. III-5*). Les divergences observées entre les deux cartes présentées peuvent être liées à une différence de maillage dans le choix des échantillons analysés. Il apparaît cependant que la zone de teneurs comprises entre 40 et 50% s'est légèrement déplacée en direction de l'est depuis 1981. La zone peu carbonatée qui s'étendait depuis l'Orne jusqu'en mer (30-40%) n'a pas été retrouvée lors de nos mesures; elle correspondrait à un sédiment fin déposé temporairement sur ces fonds en relation avec l'expulsion du bouchon vaseux de l'estuaire de l'Orne (Dubrulle, 1982; Dubrulle & Larsonneur, 1984). Vers l'embouchure de la Seine, une zone assez similaire, peu carbonatée (20-30%), se dessine centrée sur l'isobathe des -5 m CM en 1980 et entre -5 et -10 m CM en 2000. Cette zone composée d'un sable moyen à grossier présente moins de débris coquilliers.

#### 3.1.2 Répartition des paramètres granulométriques

##### 3.1.2.1 Moyenne et mode

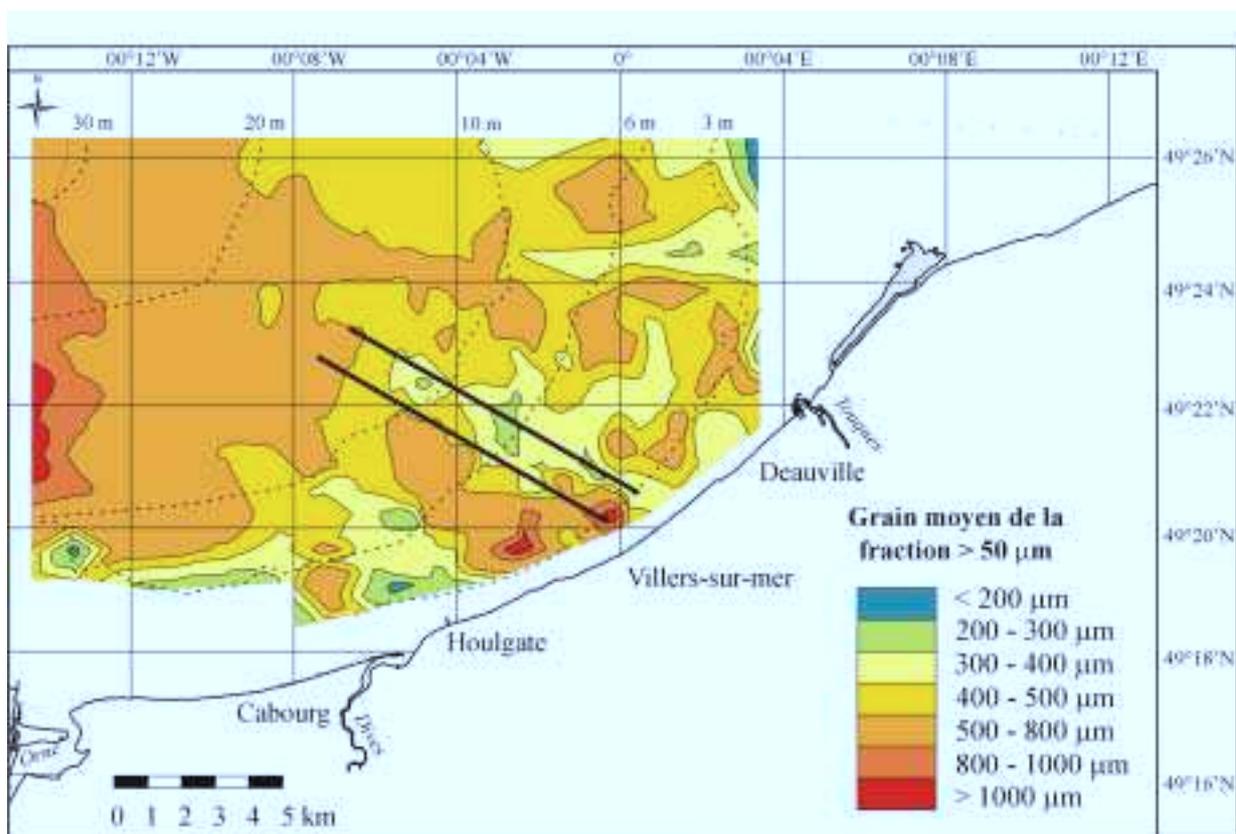
La carte de la nature des fonds de la Baie de Seine orientale (*fig. III-6*), réalisée à partir des prélèvements effectués lors des missions VASTEDEBA I et II, montre un gradient d'affinement des sédiments du large (grain moyen 800-1000  $\mu\text{m}$ ) vers la côte (grain moyen 100-200  $\mu\text{m}$ ), en accord avec les résultats de Larsonneur (1985) pour la Baie de Seine. A la limite ouest, les sables moyens du large dominant et font la transition avec les dépôts graveleux de la partie centrale de la baie. 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 CM (*fig. III-6*).



**Figure III-5.** Cartes de répartition de la fraction carbonatée en Baie de Seine sud-orientale: **a/** au début des années 1980 (Avoine, 1981) **b/** en 2000 (65 échantillons des campagnes VASTEDEBA I et II en 2000, teneurs obtenues par décalcification complète des sédiments).

Les zones principales de sédimentation fine sont similaires à celles déjà citées, à l'exception de la zone du Parfond (*fig. III-2*); d'ouest en est, on distingue les zones suivantes:

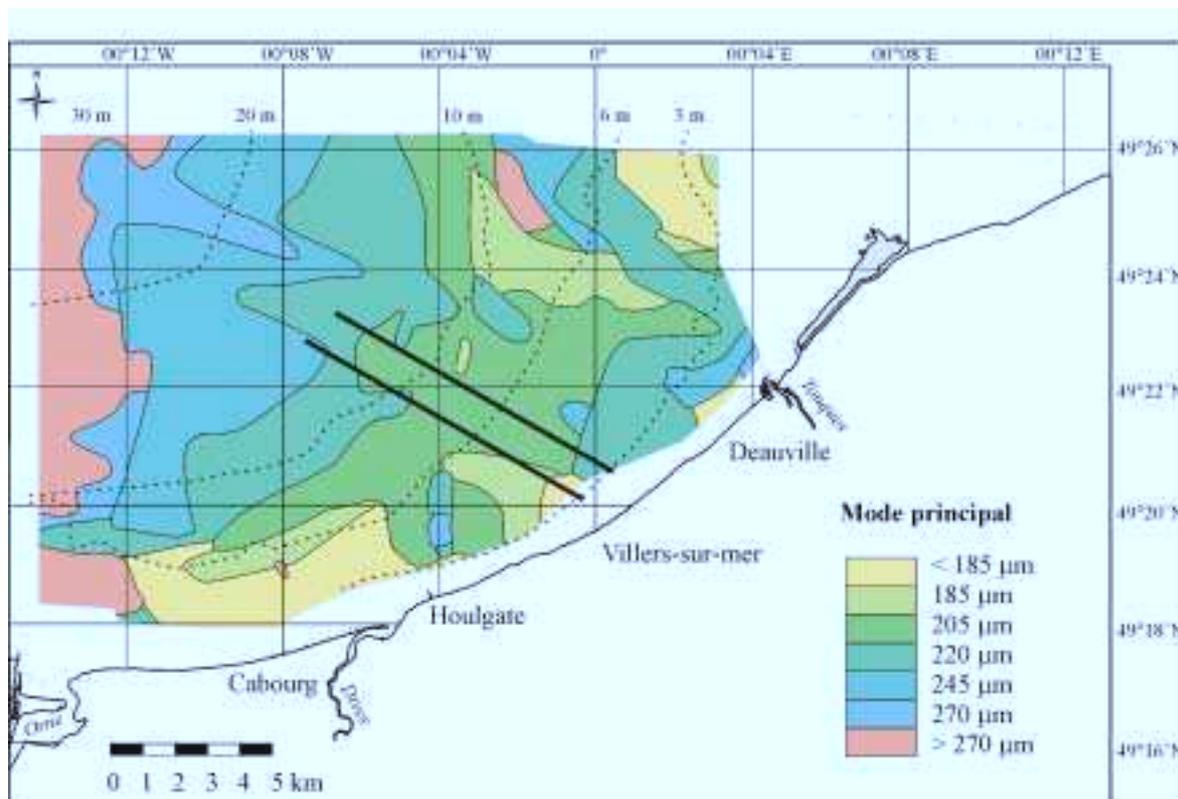
- ① à proximité immédiate du dépôt de dragage de Ouistreham,
- ② au large de Cabourg,
- ③ au large entre Villers-sur-Mer et Deauville,
- ④ l'extrémité du banc du Ratier.



**Figure III-6.** Distribution 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 VASTEDEBA 2000 (~ 550 échantillons). En trait noir, au large de Villers-sur-Mer, les deux radiales de prélèvements suivies (d'après Garnaud et al., 2002).

L'affinement des sédiments du large vers la côte du Calvados et à l'embouchure de la Seine apparaît encore plus clairement lorsque l'on s'intéresse au mode granulométrique principal de ces mêmes sédiments (*fig. III-7*). Cette organisation granodécroissante des fonds sédimentaires est liée au ralentissement des courants de marée en direction de la côte (Larsonneur & Hommeril, 1967). La coupure granulométrique entre les sables fins et moyens ( $> 270 \mu\text{m}$ ) se situe autour du parallèle  $00^{\circ}12'W$  (*fig. III-7*). On distingue également des sables relativement grossiers de mode  $\geq 270 \mu\text{m}$  isolés à l'ouest du banc du Ratier ainsi que face à Deauville. Ces sables plus grossiers présents dans un environnement

de sables fins sont aussi caractérisés par de faibles teneurs en fraction fine (*fig. III-2, p. 88*) et en carbonates (*fig. III-5*). Les conditions énergétiques qui règnent dans ces secteurs sont telles qu'elles ne permettent que de rares dépôts de fraction fine. Il est probable qu'une accélération des courants de marée en ce secteur soit responsable de la particularité de la nature sédimentaire de ces fonds proches du banc du Ratier (Cugier & Le Hir, 2000; Le Hir & Silva Jacinto, 2001; Cugier & Le Hir, 2002).

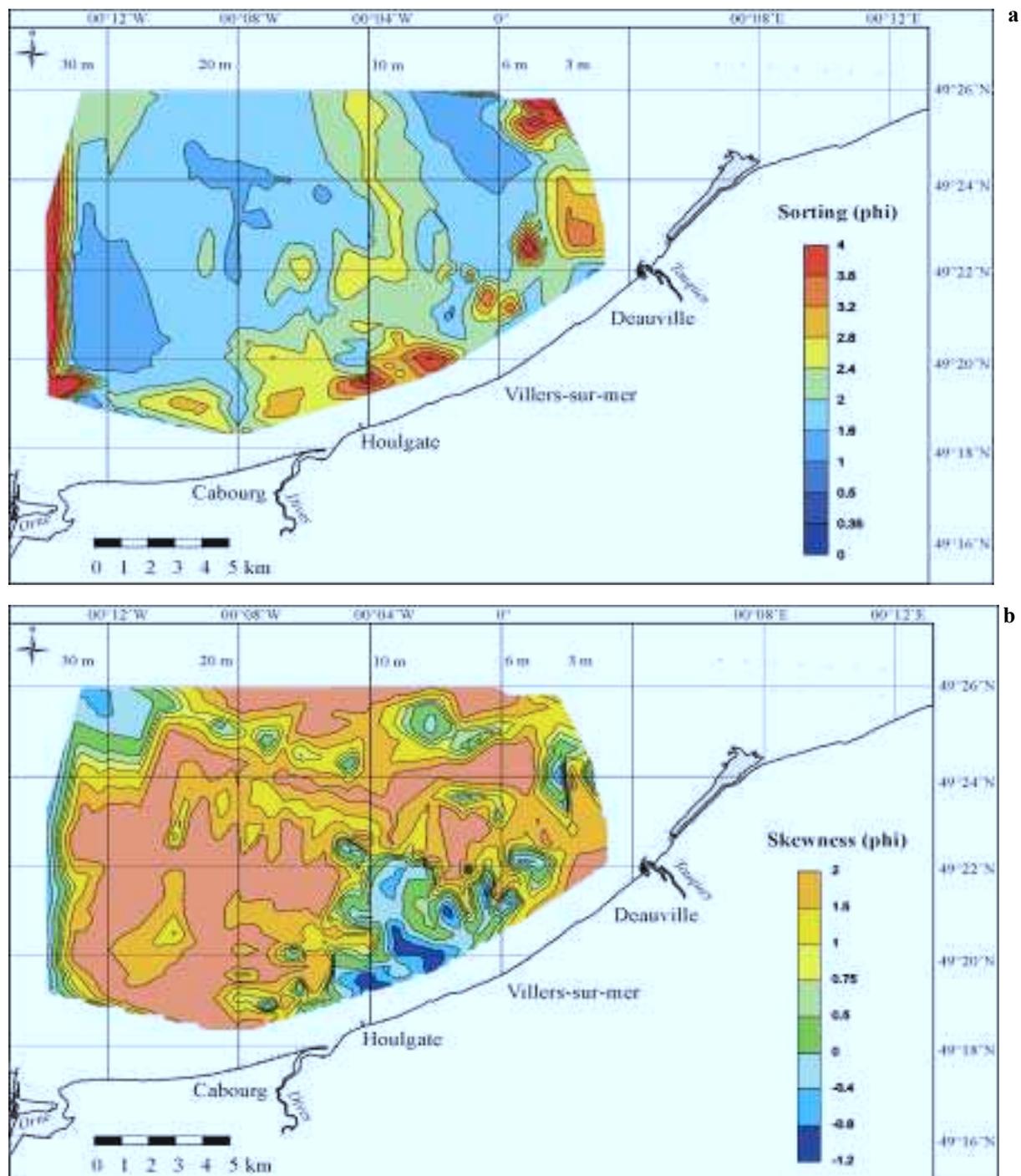


**Figure III-7.** Mode granulométrique principal de la fraction sédimentaire totale de la couverture sédimentaire superficielle de la Baie de Seine sud-orientale (Garnaud & Lesueur, 2001). Bilan des missions BENTHOSEINE 1998, 1999 et VASTEDEBA 2000.

### 3.1.2.2 Indices de dispersion et d'asymétrie

Les sédiments mal ou très mal classés (*cf. définition en annexe 2*) représentent plus de 80% des échantillons prélevés sur notre zone d'étude (*fig. III-8a*). Sur cette carte des indices de dispersion (classement, *sorting*), on distingue un secteur orienté N-S où les sédiments sont beaucoup mieux classés entre 00°04'W et 0°, principalement du fait de l'absence de fraction coquillière (*fig. III-5*). Les sédiments mal classés sont directement à relier à la présence quasi systématique d'une fraction coquillière (large de Ouistreham), ou au contraire de particules fines (long des plages du Calvados) qui influencent fortement l'indice de dispersion.

La courbe granulométrique peut-être décalée soit vers les particules fines soit vers les fractions plus grossières par rapport à sa moyenne définissant ainsi son asymétrie (*skewness*). On retrouve des valeurs négatives, révélatrices d'un excès de particules fines, le long du littoral entre Houlgate et Villers-sur-Mer et au niveau du banc du Ratier (*fig. III-8b*), où se met en place une sédimentation vaseuse.



**Figure III-8.** Cartes de la répartition des indices sédimentologiques: *a/* indice de dispersion (classement, sorting) et *b/* indice d'asymétrie (*skewness*). Le détail du calcul de ces paramètres est présenté en annexe 2 et s'appuie sur la méthode des moments d'ordre  $m_k$  (McManus, 1988).

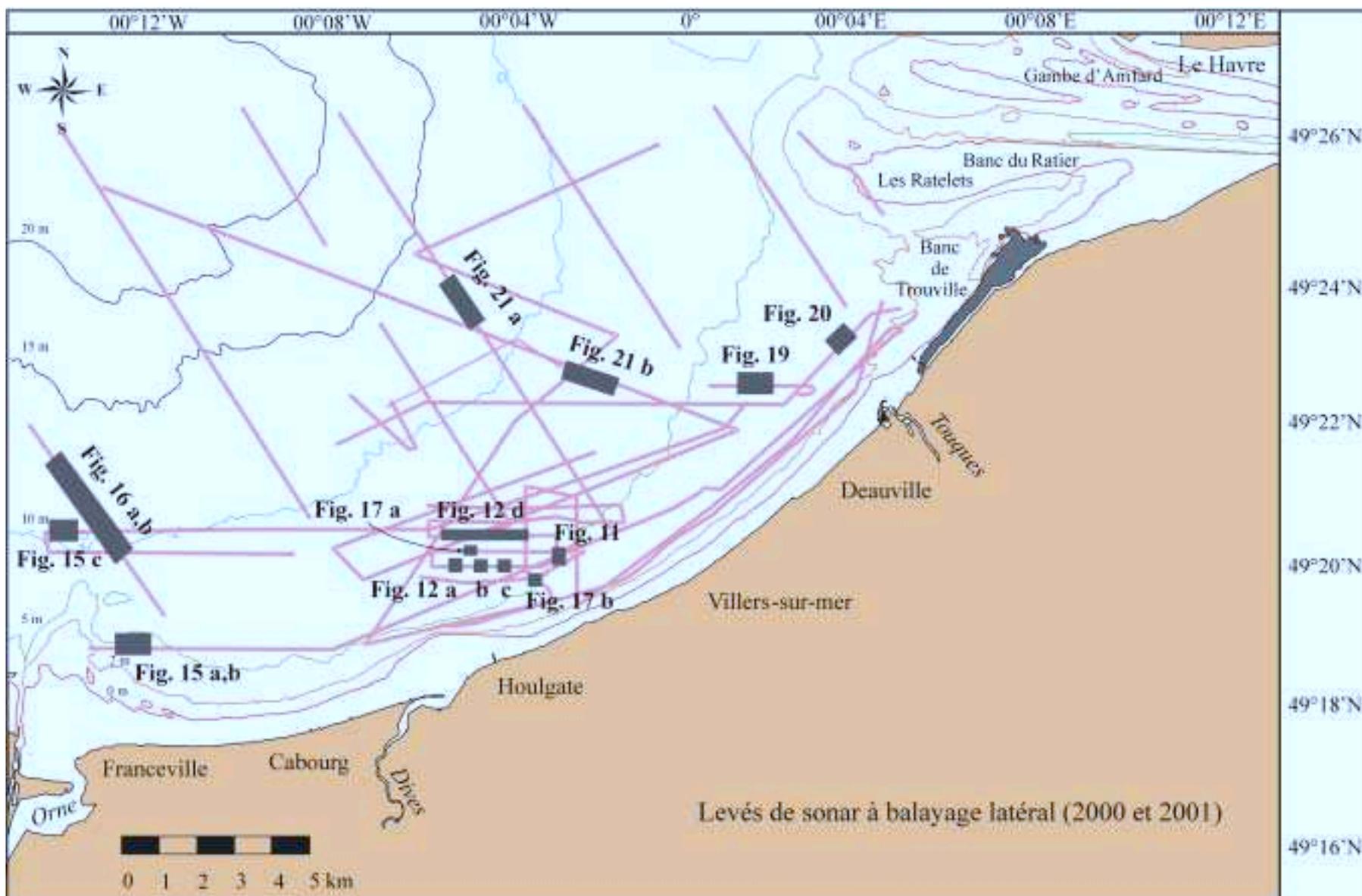
### 3.1.3 Etudes des figures sédimentaires (prospection au sonar à balayage latéral)

Le sonar à balayage latéral est, depuis de nombreuses années, largement utilisé dans des missions de reconnaissance sous-marine de la nature des fonds et des formes sédimentaires associées sur les plates-formes continentales (Morang & McMaster, 1980; Auffret *et al.*, 1984; Auffret & d'Ozouville, 1986; Berné *et al.*, 1986; Twichell *et al.*, 1998; Cirac *et al.*, 2000; Cochrane & Lafferty, 2002; Walker, 2002). Ce moyen d'investigation est d'autant plus intéressant lorsque les fonds montrent des contrastes de répartition des faciès sédimentaires ou encore des structures de déplacement. La Baie de Seine a déjà fait l'objet d'une reconnaissance par sonar à balayage latéral permettant de mettre en évidence des structures de transit particulièrement nombreuses dans sa partie occidentale (mégarides, rubans sableux ou queues de comètes) (Auffret *et al.*, 1984; Auffret & d'Ozouville, 1986). Par contre, ces premiers enregistrements avaient montré que les fonds de la Baie de Seine sud-orientale présentaient peu de structures sédimentaires et de contraste de nature des fonds. A l'époque, seules quelques structures de transit avaient été notées à l'extrémité du banc du Ratier.

Grâce au soutien logistique du SHOM, une prospection au sonar à balayage latéral de la Baie de Seine orientale, plus complète que celle réalisée au cours des années 1980, a été entreprise à deux reprises lors des missions VASTEDEBA II et III, à un an d'intervalle (*fig. III-9 et annexe 1*). Le premier levé a été réalisé afin de repérer les figures sédimentaires depuis le domaine le plus côtier jusqu'au Parfond (détail du levé présenté en annexe 1). La deuxième mission s'est déroulée le long de la côte (< 6 m) au large de Cabourg et Deauville. Ces nouvelles missions ont permis de mettre en évidence de nombreuses figures sédimentaires entre -1 et -6 m CM.

#### 3.1.3.1 Nature des faciès acoustiques

En Baie de Seine orientale, le faible contraste de rétrodiffusion entre les sédiments fins vaseux et les sables est peu propice à l'utilisation du sonar à balayage latéral comme méthode d'identification des changements de faciès sédimentaires. Mais l'ensemble des données de prélèvements ont largement permis de couvrir le secteur d'étude et de connaître précisément la répartition de ces faciès sédimentaires. Cependant, l'utilisation du sonar à balayage latéral s'est révélée indispensable afin de (1) cartographier les argiles reliques au faciès acoustique très caractéristique et (2) rechercher des indices de transport ou d'érosion, permettant d'identifier des sens de transit sédimentaire et ainsi valider l'approche des transports sédimentaires résiduels d'après la méthode de Gao et Collins (*cf. § 5*).



**Figure III-9.** Localisation des profils de sonar à balayage latéral réalisés lors des missions VASTEDEBA II et III. Les rectangles grisés numérotés correspondent aux différentes figures présentées à la suite dans ce chapitre, extrait de sonogrammes obtenus sur ces différents profils. Les numéros sont ceux de ce chapitre III.

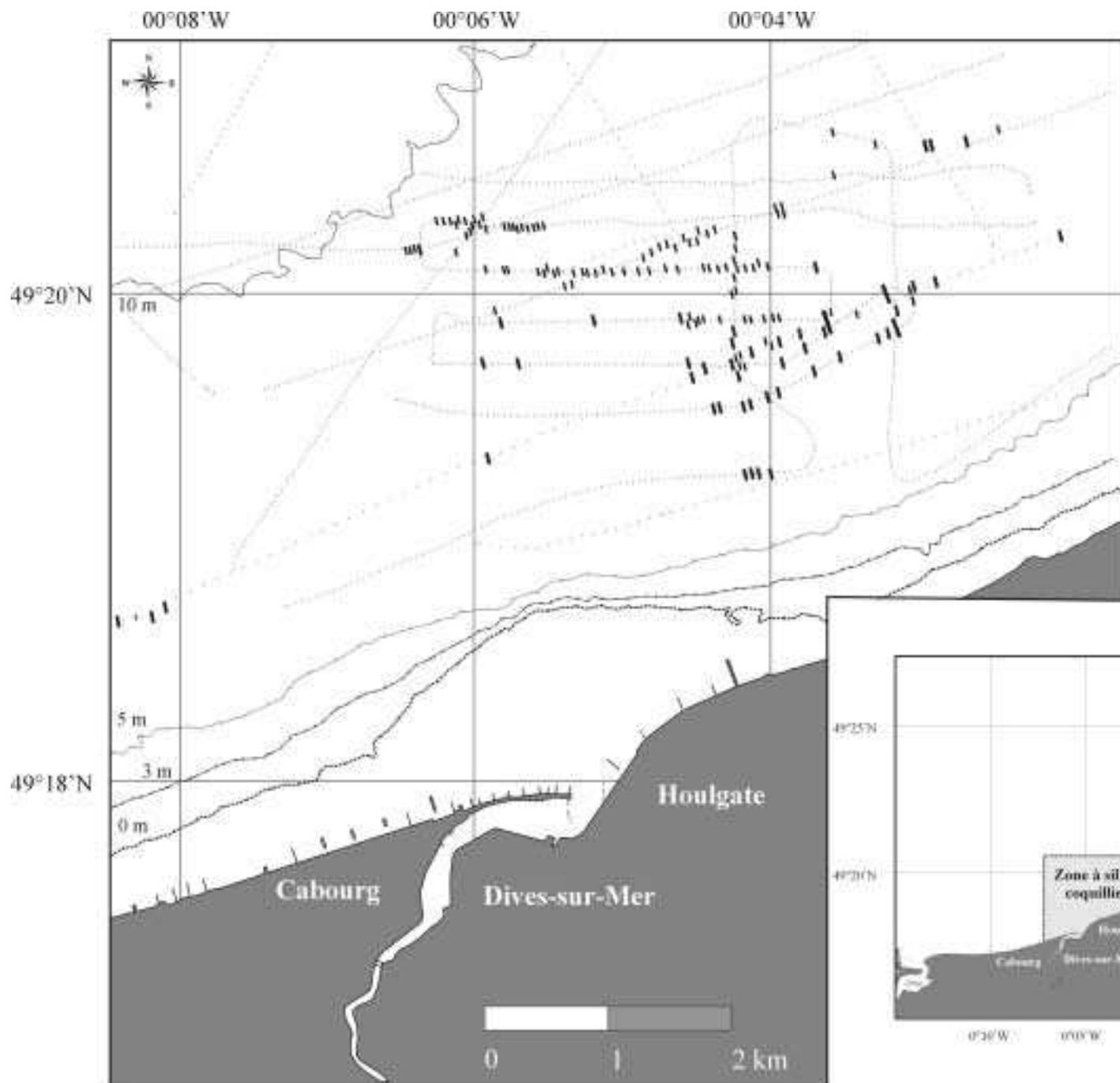
### 3.1.3.2 Figures d'érosion: les sillons coquilliers

Les bennes Shipeck réalisées lors de la première mission VASTEDEBA (mars 2000) avaient montré qu'en certains sites de prélèvements les fonds au large d'Houlgate étaient exclusivement constitués de coquilles brisées dans un secteur pourtant dominé par des sables fins. Ces observations nous ont conduit à explorer cette zone particulière à l'aide du sonar à balayage latéral (*fig. III-9*). Ainsi, un grand réseau de sillons ramifiés (plus de 150 répertoriés) et ornés de mégarides<sup>2</sup> a été mis en évidence sur un secteur géographique très localisé au large d'Houlgate (*figs. III-10, III-11 et III-12*). Lors d'une reconnaissance antérieure des fonds à partir de la même méthode (Auffret & d'Ozouville, 1986), de tels sillons à matériel graveleux avaient été notés entre l'Orne et la Touques, sans aucune délimitation de leur extension géographique. A l'époque, la nature des sédiments tapissant l'intérieur des sillons n'avait pas été calibrée par des prélèvements mais la forte rétrodiffusion de ce matériel sur les enregistrements sonar laissait penser à un sédiment grossier de type graveleux, par analogie avec les observations de structures similaires faites dans la Baie de Morlaix en 1983 et 1984 (Auffret *et al.*, 1992). Ainsi, cette nouvelle couverture sonar permet de proposer une carte précise de la répartition de ces sillons en domaine subtidal, entre -6 m et -10 m CM (*fig. III-10*).

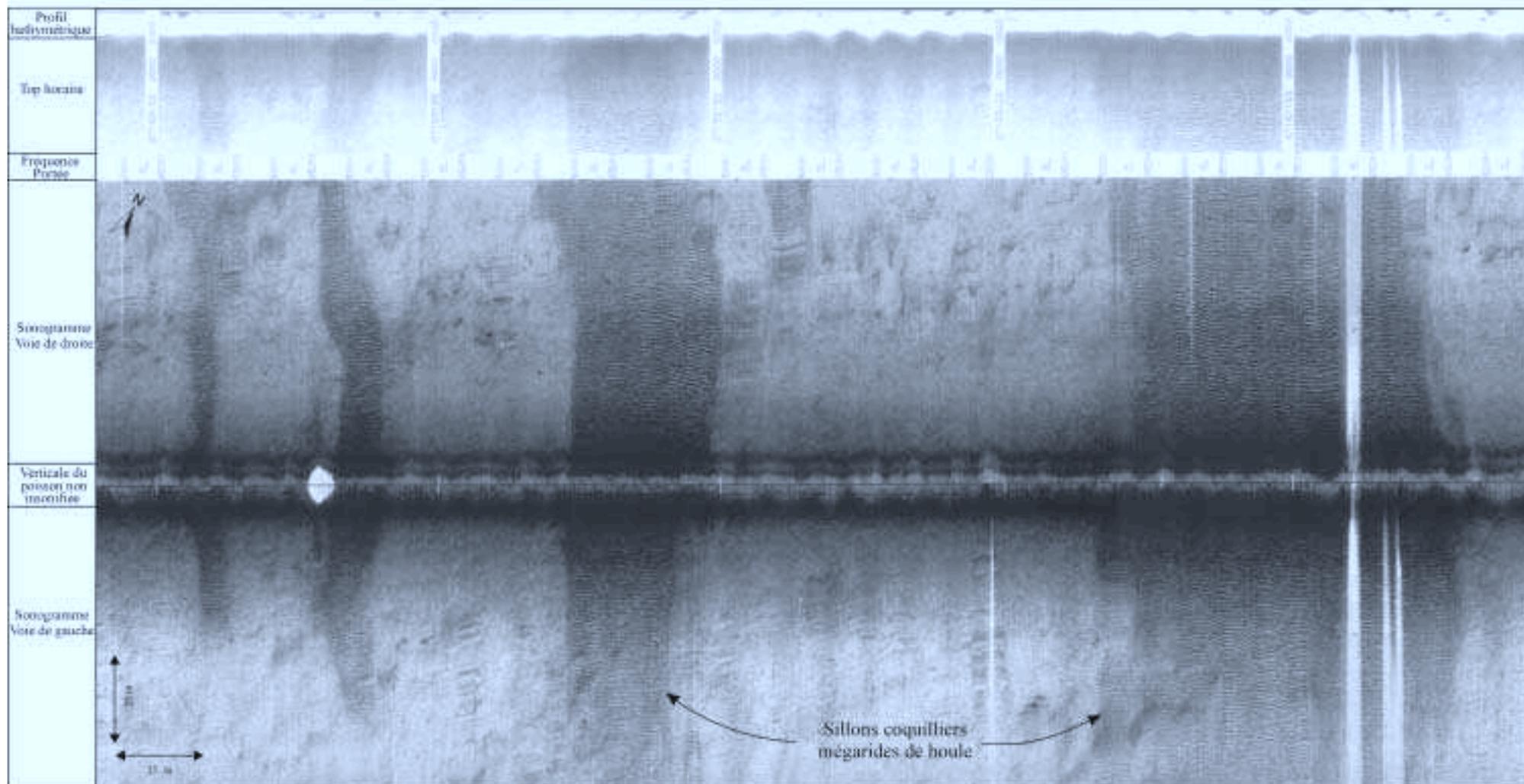
Le matériel sédimentaire qui remplit ces sillons a été identifié grâce à des prélèvements à la benne Shipeck: c'est un sédiment composé exclusivement de débris coquilliers. La fraction sableuse est quasiment absente dans ce matériel et une fraction fine est parfois présente. Des carottages courts (Reineck) montrent que ces sédiments grossiers ne sont pas très épais, moins de 10 cm (*fig. III-13*). Ces dépôts grossiers se retrouvent systématiquement en contact érosif sur les argiles reliques sous-jacentes (*fig. III-13, p. 102*). Sur les deux carottes présentées (*fig. III-13*), les coquilles brisées sont recouvertes, mais non mélangées, de sables fins (carotte 2681) ou envasés (carotte 1120). Les 2 missions de prospection au sonar à balayage latéral effectuées à un an d'intervalle montrent que les limites des sillons évoluent rapidement. Cependant, il est peu probable que les sillons se déplacent réellement car ils sont quasi-figés dans les argiles reliques compactes. Les changements de forme observés sont plutôt liés aux déplacements de la couverture sédimentaire superficielle, sous l'influence de la houle et des courants de marée. Une conclusion analogue avait été proposée suite à l'étude de l'évolution des sillons en Baie de Morlaix (Auffret *et al.*, 1992).

---

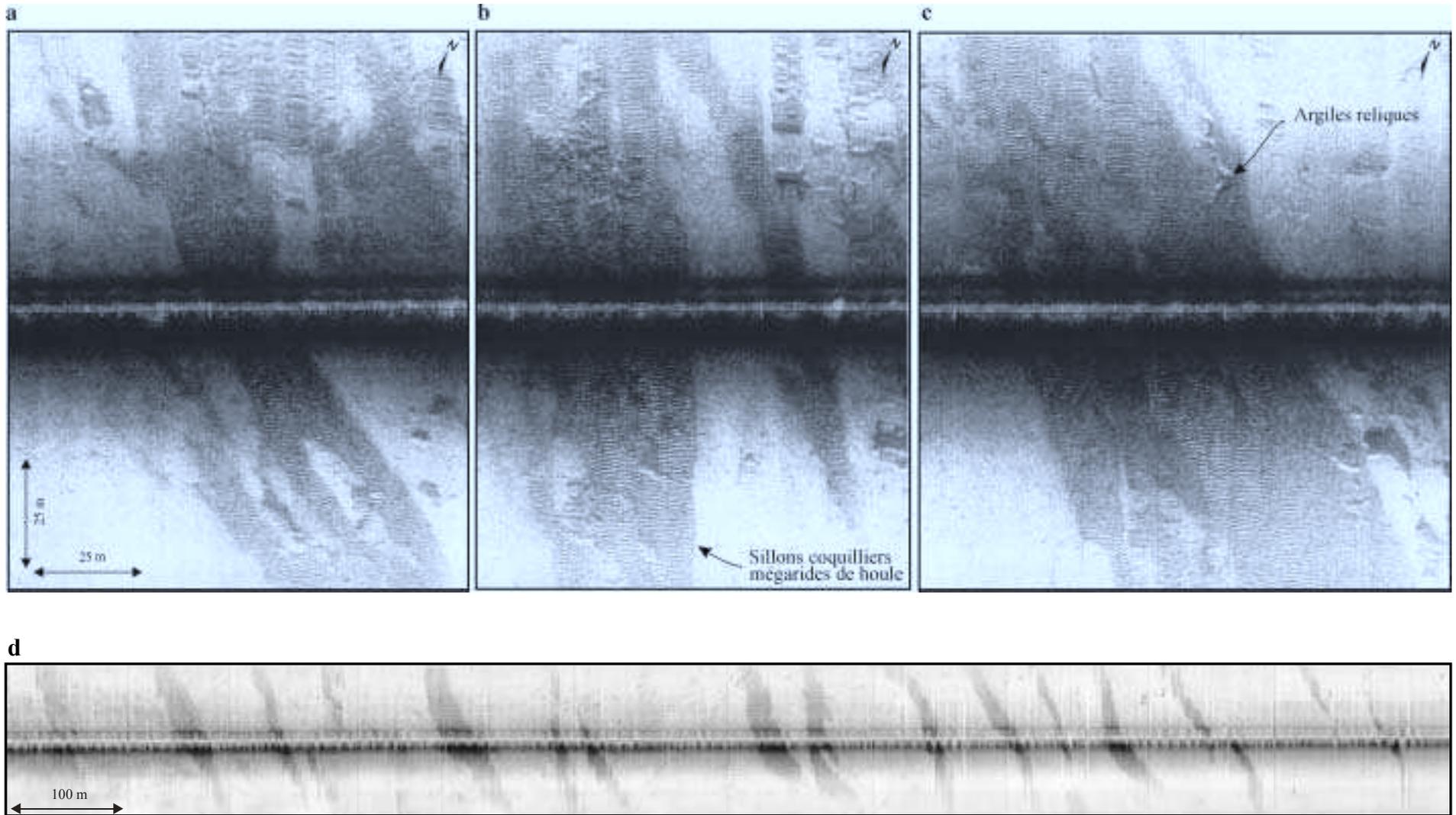
<sup>2</sup> La nomenclature des formes sédimentaires transverses (Berné *et al.*, 1989) définissent les mégarides comme étant des structures de hauteurs comprises entre 0,06 et 1,5 m et de longueur d'onde de 0,6 à 20 m.



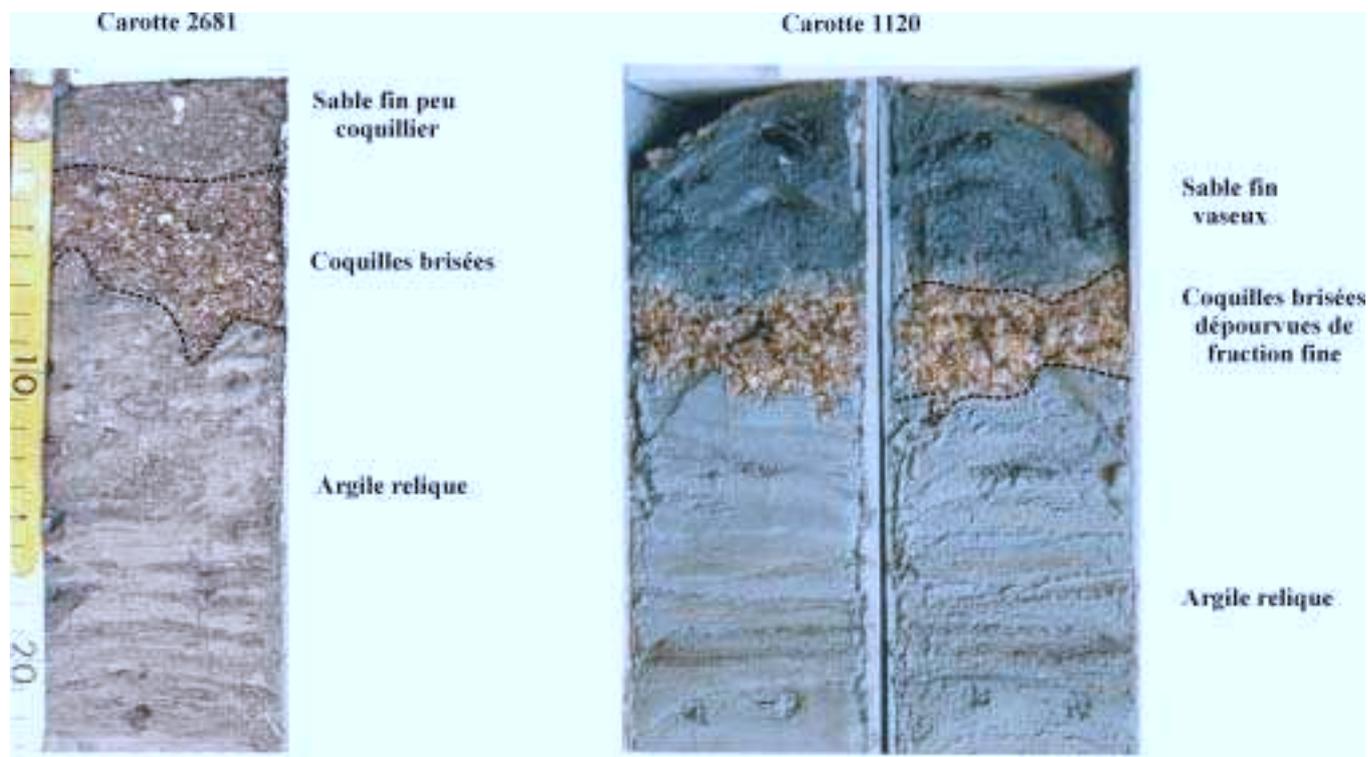
**Figure III-10.** Localisation des sillons coquilliers en Baie de Seine sud-orientale d'après l'interprétation des images de sonar à balayage latéral (juin 2000 et 2001). Les sillons sont symboliquement représentés en noir mais leurs largeur et longueur sont exagérées pour en faciliter la lecture. En pointillés: profils sonar.



**Figure III-11.** Exemple de sonogramme obtenu sur le secteur des sillons coquilliers au large d'Houlgate (localisation fig. III-9, p. 97). La bordure entre les sillons et les sables fins voisins est toujours très nette. Le profil bathymétrique (partie haute de l'enregistrement) indiqué par le poisson correspond la plupart du temps à l'enregistrement de l'oscillation de la houle notable lors de cette mission et non aux variations bathymétriques du fond. Les figures présentes entre les sillons sont liés à de petits affleurements d'argile relique et aux artefacts générés par la houle. Les traces blanches verticales correspondent également à des artefacts traduisant des décrochements acoustiques du suivi du fond par le poisson remorqué.



**Figure III-12.** Extraits de sonogrammes montrant la disposition des sillons coquilliers au large d'Houlgate (localisation fig. III-9, p. 97). Les 3 premières images (a, b et c) ont été obtenues sur les sillons présents les plus à la côte et dans ce cas les argiles fossiles apparaissent également en relief sur les sonogrammes. Le long profil (d) a été obtenu plus au large, au-dessus du parallèle 49°20 N, où les argiles compactes ne sont pas affleurantes.



**Figure III-13.** Disposition des coquilles brisées correspondant au remplissage des sillons. Le niveau coquillier repose toujours sur les argiles reliques. Sur ces deux carottes, le matériel coquillier comblant les sillons n'est plus mobile puisqu'il est recouvert de sables.

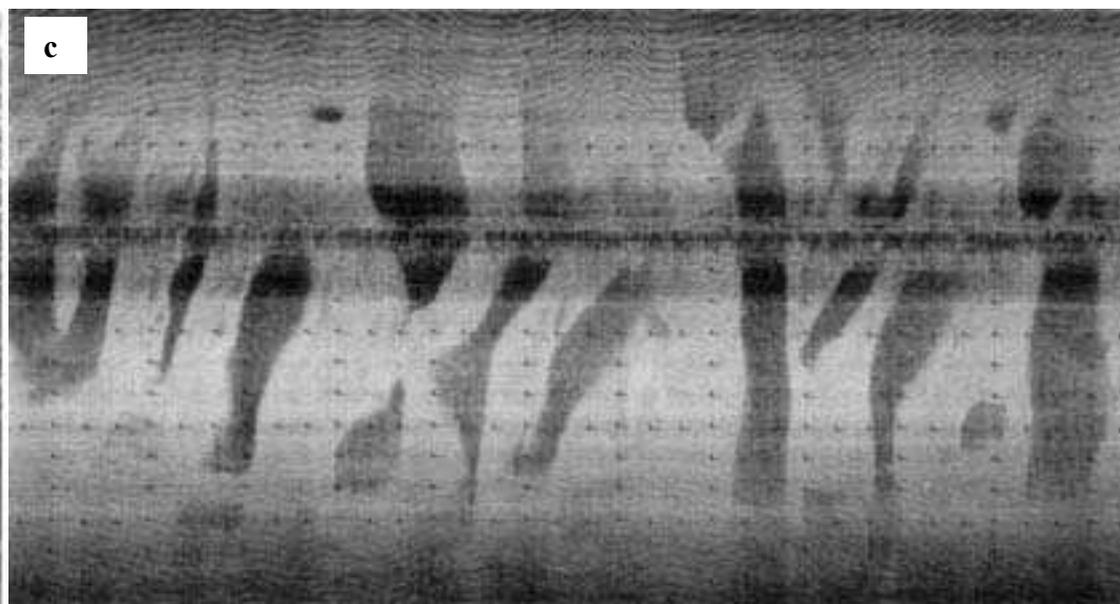
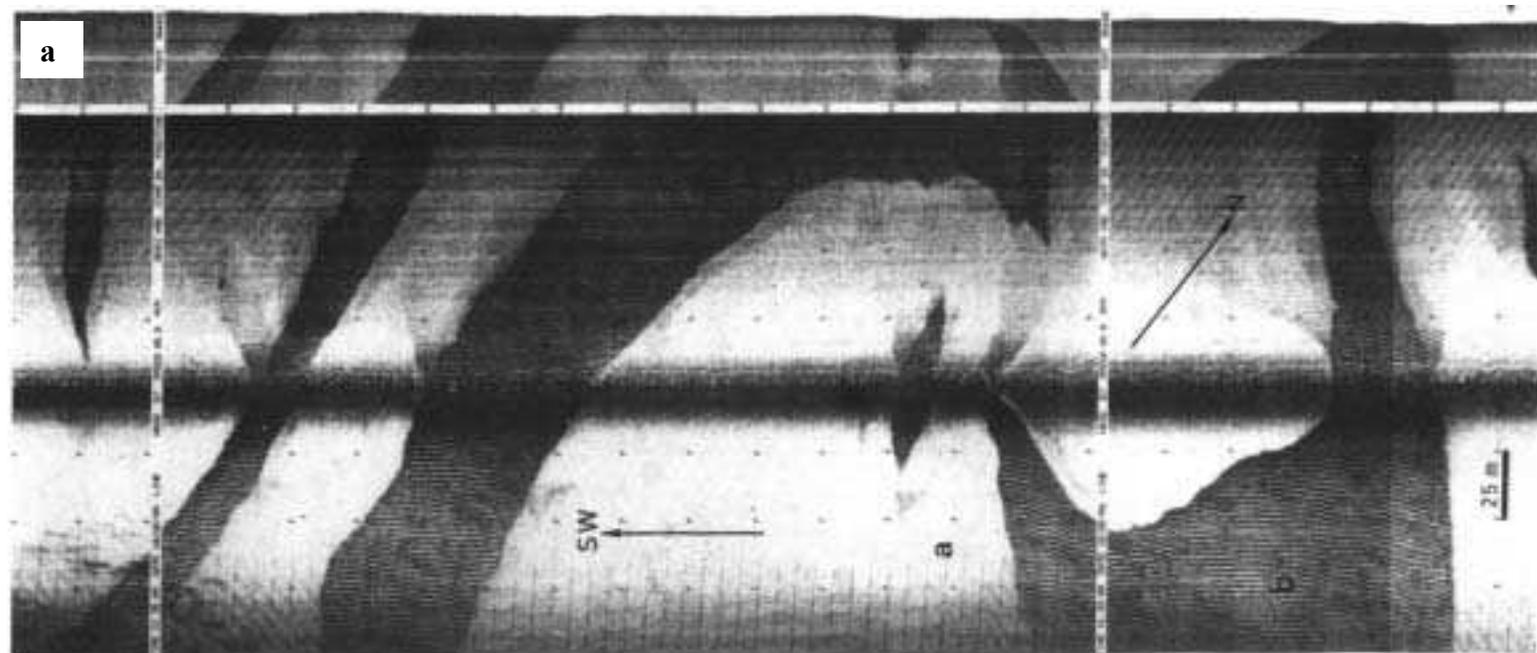
Ce réseau de sillons ramifiés (*figs. III-10 et III-12d*) comporte au minimum une centaine de lieux observé sur notre couverture au sonar à balayage latéral non complète. Les caractéristiques morphologiques de ces structures sont les suivantes: ils sont espacés les uns des autres de 75 m en moyenne (30-200 m), les mégarides subparallèles au littoral présentes à l'intérieur des sillons ont une hauteur (H) de 10 à 20 cm et des longueurs d'onde régulières ( $\lambda$ ) comprises entre 1,2-1,5 m. Les longueurs des sillons sont comprises entre 50-75 m et 150-200 m. Leurs profondeurs par rapport aux fonds adjacents atteignent au maximum 40 à 50 cm. Or, Auffret et d'Ozouville (1986) avaient observé des profondeurs métriques pour ces mêmes sillons en 1982-83. L'érosion des fonds de la Baie de Seine orientale, et en particulier du secteur où les argiles reliques affleurent, peut expliquer cette diminution de la profondeur des sillons (érosion des fonds adjacents). Cette observation sera complétée plus loin (*cf. § 6.2.1*). En supposant que la profondeur des sillons est passée réellement de 1 m en 1982-83 (Auffret, communication personnelle) à moins de 50 cm en 2000, l'érosion serait de l'ordre de  $2,5 \text{ cm.an}^{-1}$ .

Ce type de structure érosive en sillons est présent sur tout le plateau continental français: en Baie de Morlaix (Auffret *et al.*, 1992), sur la plate-forme aquitaine (Turcq, 1984; Turcq *et al.*, 1986; Cirac *et al.*, 2000), dans le golfe du Morbihan (Augris,

communication personnelle), sur le plateau basque et la façade ouest de la Corse (Augris & Clabaut, 2001)(*fig. III-14*). Toutefois, même si ces formes sédimentaires sont similaires par leurs caractéristiques morphologiques et granulométriques, leur origine est bien souvent discutée (Flood, 1981, 1983). En effet, les sillons observés sur la plate-forme aquitaine (Turcq, 1984; Turcq *et al.*, 1986; Cirac *et al.*, 2000) et en Baie de Morlaix (Auffret *et al.*, 1992) possèdent une semelle plus grossière mise à l'affleurement par l'érosion de la couverture sédimentaire superficielle, ce qui n'est pas le cas de ceux rencontrés en Baie de Seine sud-orientale (*tabl. III-1*). Les sillons coquilliers que nous observons s'apparentent plus à ceux observés hors de nos frontières sur la plate-forme américaine: Cacchione *et al.* (1984) et Ferrini et Flood (2002) en Californie, Morang and McMaster (1980) en Rhode Island et Hunter *et al.* (1988) dans la Monterey Bay (*tabl. III-1*). Les mégarides qui ornent les sillons sont typiquement des mégarides de houle que l'on peut suivre sur plusieurs dizaines de mètres de long. On ne peut exclure le rôle de courants de retour pour la formation de ces sillons même par des profondeurs de -10 m CM (Reimnitz *et al.*, 1976; Morang & McMaster, 1980; Flood, 1981, 1983). Il est cependant plus probable que ces sillons se soient formés sous l'influence des houles et particulièrement celles liées aux tempêtes comme le montrent de nombreux travaux sur ce sujet (*tabl. III-1*). Enfin, il convient de noter que dans le cas de notre site d'étude, la nature coquillière du matériel contenu dans les sillons a un rôle abrasif important qui creuse les formations reliques compactes sous-jacentes. Un cas d'étude similaire dans la partie centrale du Long Island Sound (côte Est des USA) montre que les coquilles à l'intérieur des sillons d'érosion jouent, pendant leur transport, un rôle abrasif sur les sédiments vaseux consolidés sous-jacents par 20 m de profondeur (Knebel & Poppe, 2000; Poppe *et al.*, 2002).

Référence	Caractéristiques							Processus
	Bathymétrie	Profondeur	Largeur	Longueur	Ecart	Orientation	Matériel	
Baie de Morlaix, France (Auffret <i>et al.</i> , 1992)	15-25 m	2 - 4 m	40 m	700-1500 m	100-300 m	Perpendiculaire à la côte	Coquilles de bivalves et fragments coquilliers (85-95% de CaCO <sub>3</sub> )	Sillons graveleux ( <i>gravel furrows</i> ) (fig. III-14a et b) Mégarides: $\lambda$ : ~ 1,0 m Formés par la houle ou l'action conjointe de la houle + courant parallèle aux crêtes des mégarides, recouvrement des sillons par les sables fins observés après des épisodes de tempête.
Monterey, Bay USA (Hunter <i>et al.</i> , 1988)	10-20 m	1 m	20-100 m	10 m à plus de 1000 m	20-100 m	20° avec la côte	Sable grossier (moyenne: 0,68 mm)	Dépressions allongées à graviers ( <i>elongate gravel-floored depressions, furrows</i> ) Mégarides: H: 15 cm, $\lambda$ : 0,8-1,5 m Origine ?
Middle atlantic Bigh, USA (Swift, 1978; Swift <i>et al.</i> , 1979)	5-30 m	1 m	10 m à plusieurs 100 <sup>me</sup> de m	/	10-100 m	Perpendiculaire à la côte	Sable grossier ou graviers coquilliers	Bandes allongées ( <i>elongate bande</i> ) Mégarides: $\lambda$ : 0,5-2,0 m Formées par des courants côtiers parallèles à la côte induits par les vents.
Mer de Bering (Hunter <i>et al.</i> , 1982)	4-15 m	/	10-500 m	/	irrégulier moyenne de 450 m	Oblique à la côte	Galets, graviers et sables grossiers	Rubans ( <i>ribbons</i> ) ou placages allongés ( <i>elongate patches</i> ) Mégarides: $\lambda$ : 0,5-2,0 m Formés par l'action des vents dominants (fetch) et par la réfraction des grandes vagues incidentes.
Rhode Island, USA (Morang & McMaster, 1980; Knebel <i>et al.</i> , 1982)	0-10 m	/	50 m	/	irrégulier	Perpendiculaire à la côte	/	Rubans ou bandes allongés ( <i>elongate strips or bands</i> ) Mégarides: $\lambda$ : 0,7-1,5 m Formés par des courants de retour ( <i>rip currents</i> ) issus des grandes vagues de tempête.
Californie, USA (Cacchione <i>et al.</i> , 1984)	30-70 m	40 cm	5-500 m	/	irrégulier	Perpendiculaire à la côte	Sable grossier coquillier	Dépressions allongées ( <i>rippled elongated scour depressions</i> ) Mégarides: H: 7-36 cm, $\lambda$ : 1,0-1,7 m Formées par des courants de fond générés par des tempêtes associés à des courants descendants côtiers ( <i>coastal downwelling</i> ) pendant la fin de l'automne et l'hiver.
Plate-forme nord-aquitaine, France (Turcq, 1984; Turcq <i>et al.</i> , 1986; Arbouille, 1987; Cirac <i>et al.</i> , 2000)	80-140 m	1 à 2 m	/	200-300 m	20-50 m	WNW-ESE Oblique à la côte	Graviers et sables grossiers	Linéations de type sillons érosifs ( <i>erosional furrows</i> ) ou sillons longitudinaux ( <i>longitudinal furrows</i> ) (fig. III-14c) Coulours à graviers ( <i>depressions and furrows</i> ) Formés par des grandes vagues de tempête
	30-50 m et 60-85 m	2 m max	100 m à plusieurs km	Plusieurs km à dizaines de km	/	Parallèle à la côte	Graviers et sables grossiers	Bandes de graviers et sables grossiers ( <i>elongated depression</i> ) Mégarides: $\lambda$ : 1 m En relation directe avec l'hydrodynamisme de tempête.
Long Island, New York, USA (Shipp, 1984)	10-16 m	/	/	/	/	Patch pas d'orientation	Sable grossier à très grossier	Patches ( <i>Patchy units</i> ) Mégarides: H: 10-20 cm, $\lambda$ : 0,6-0,8 m Formés par des grandes vagues de tempête exceptionnelle ou longues périodes de houle.
Baie de Seine Ce travail	6-10 m	50 cm	30-200 m	50-200 m	50-100 m	Perpendiculaire à la côte	Coquilles brisées	<b>Sillons coquilliers</b> <b>Mégarides: H: 10-20 cm, <math>\lambda</math>: 1,2-1,5 m</b> <b>Probablement formés par des grandes vagues de tempête exceptionnelle ou longues périodes de houle.</b>

Tableau III-1. Synthèse de quelques travaux décrivant des sillons érosifs dans différents domaines de plate-forme mondiale et intégration de nos travaux.



**Figure III-14.** a) Sonogramme montrant les deux faciès sédimentaires rencontrés en Baie de Morlaix (Auffret et al., 1992). a/ sables calcaires fins; b/ graviers coquilliers. La largeur moyenne des sillons est de 40 m (extrêmes 10-100 m). Leur longueur s'accroît d'est en ouest de 700 à 1500 m. Leur profondeur est de l'ordre de 2 à 4 m et ils sont distants les uns des autres de 100 à 300 m (tabl. III-1).

b) Photographie sous-marine des graviers coquilliers présentés sur l'imagerie sonar a) sous la légende b (Auffret et al., 1992).

c) Enregistrement de sonar à balayage latéral sur le plateau continental nord-aquitain montrant un placage sableux (en clair) et des dépressions allongées, dans un sédiment grossier (en sombre) (Turcq, 1984; Turcq et al., 1986; Cirac et al., 2000) (tabl. III-1).

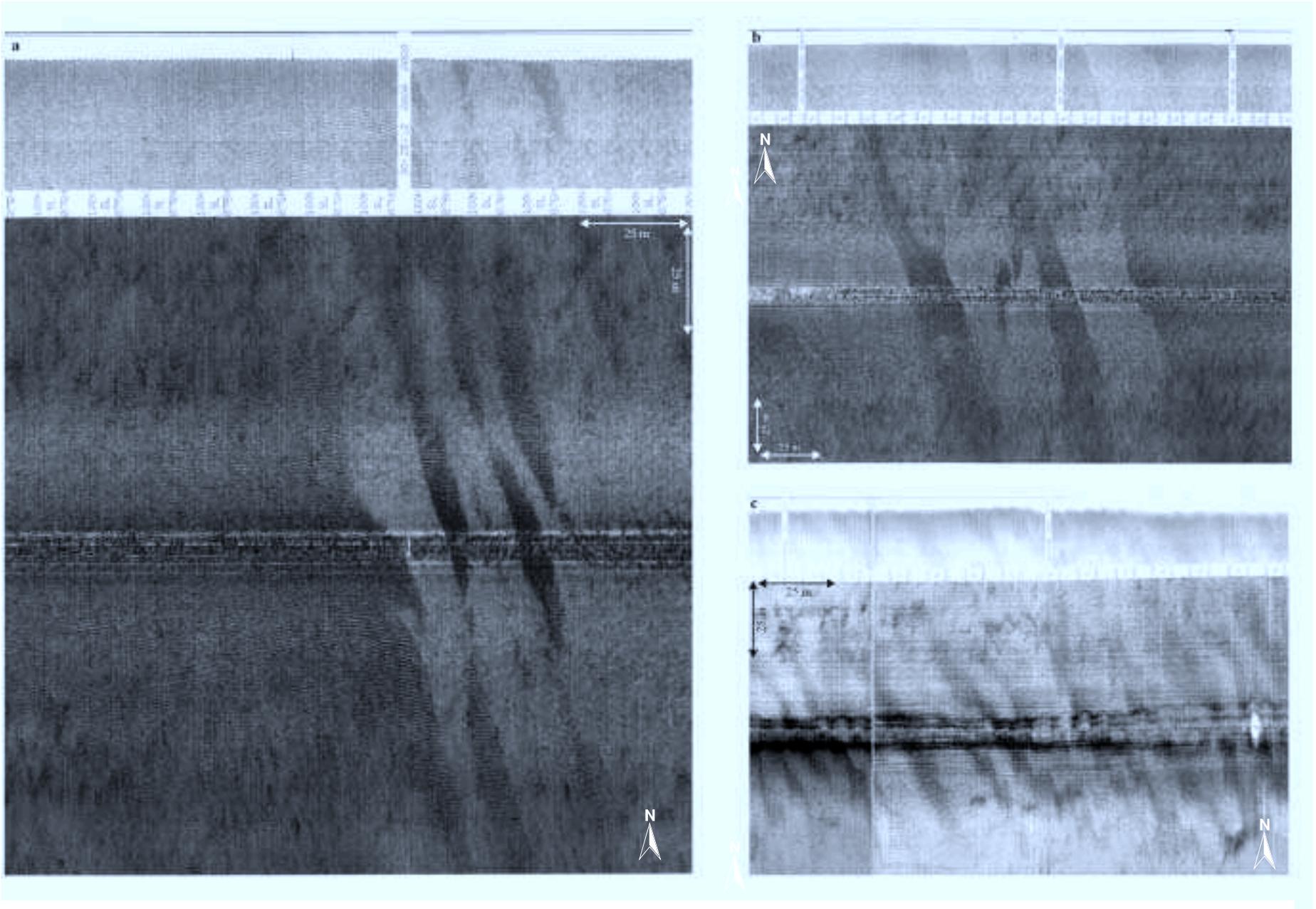
### 3.1.3.3 Mégarides et voiles sableux

Les mégarides n'apparaissent en Baie de Seine sud-orientale que de manière très localisée principalement (1) à l'intérieur des sillons coquilliers précédemment décrits et (2) au NE de Ouistreham. Le matériel sédimentaire qui constitue ces mégarides est toujours composé de sables moyens à grossiers. Le plus grand champ de rides observé sur le domaine d'étude se situe dans la continuité du banc aux Oiseaux, qui forme la partie est du delta de jusant de l'embouchure de l'Orne (*fig. III-15a, b*). Ces rides se mettent en place dès -5 m CM et se prolongent en direction de la côte sur plusieurs centaines de mètres. Les plus hautes mégarides rencontrées (~ 1 m) sont présentes par -10 m CM de profondeur toujours en face de Ouistreham (*fig. III-15c*). C'est sur ce même secteur qu'apparaissent également des structures composites à bords diffus, transverses au littoral, séparées par un faciès acoustique plus sombre. Sur les sonogrammes, ces figures sédimentaires présentent un aspect voilé et s'organisent en deux directions bien distinctes: l'une NW-SE et l'autre secondaire NNW-SSE (*fig. III-16*). Ce sont des figures de type "ruban" composées de sables fins (blanc pâle sur les sonogrammes, *fig. III-16 a,b*) qui contrastent avec le fond de nature plus grossière (en sombre sur les sonogrammes, *fig. III-16 a,b*). Compte tenu des limites diffuses et de l'aspect voilé qui caractérisent ces structures, on préfère employer le terme de voile sableux pour les définir. Il n'est pas possible de préciser la longueur de ces voiles, qui s'imbriquent les uns dans les autres, sans une couverture plus complète de ce secteur; par contre, leur largeur est de l'ordre de la centaine de mètre.

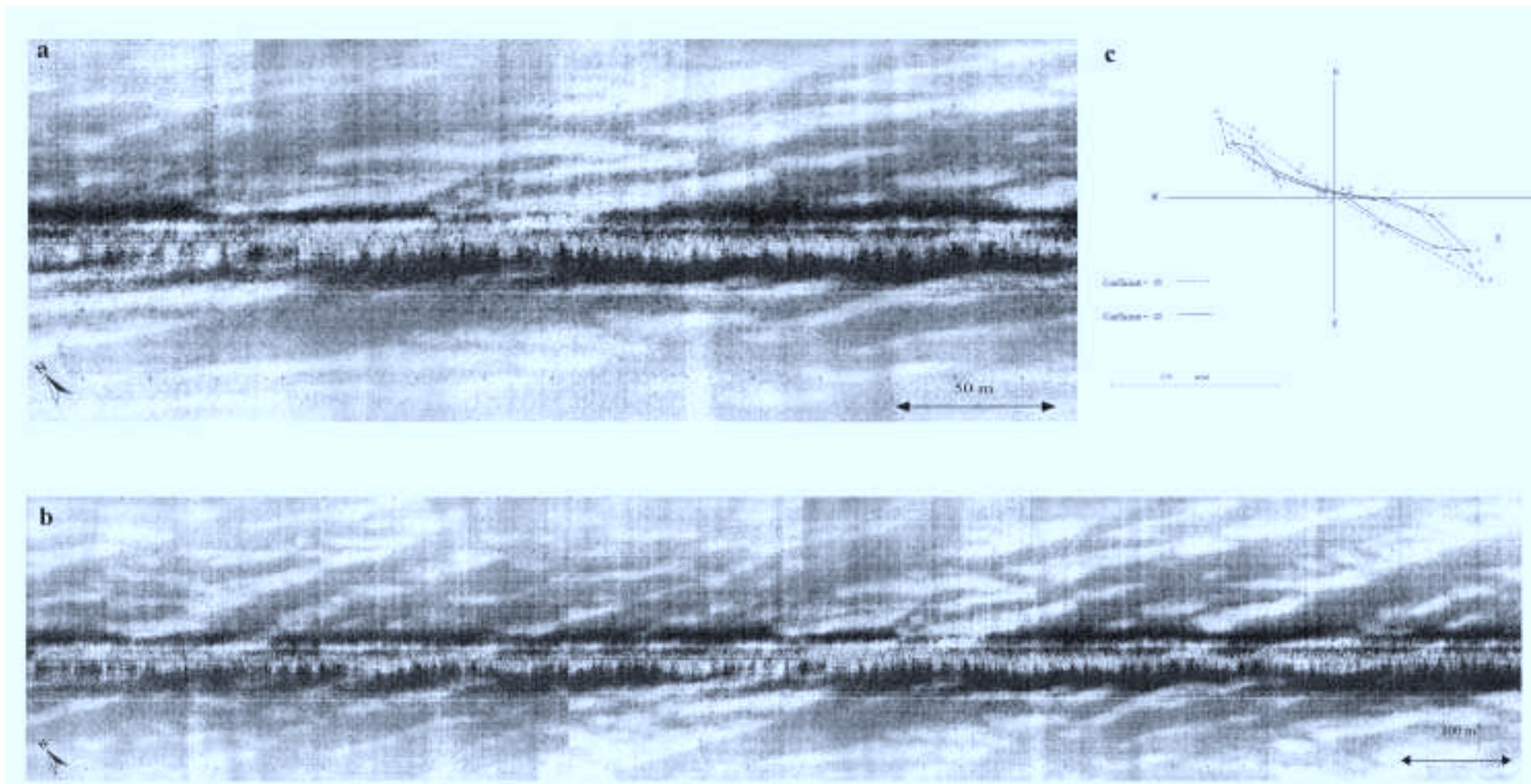
Les mesures de courants existantes à proximité de ces structures (données SHOM, *fig. III-16c*) permettent de proposer une explication de la présence des 2 directions d'organisation de ces voiles. La dissymétrie en surface des vitesses de courants de marée en faveur du flot ( $1,3 \text{ m.s}^{-1}$  pour une marée de vive-eau moyenne) indique une résultante du courant vers le SE; c'est la première orientation constatée sur les sonogrammes. La seconde, NNW-SSE, pourrait correspondre à une mise en place de ces mêmes sables fins lors de l'étalement de pleine et de basse mer (Auffret, communication personnelle).

### 3.1.3.4 Fonds marins fossiles

L'ensemble des enregistrements sonar fournit des informations nouvelles concernant la répartition superficielle des dépôts argileux reliques. Au large de Cabourg, les sonogrammes font apparaître un faciès très sombre dont le relief peut atteindre 60 cm (*fig. III-17, p. 110*). Cette réponse acoustique pourrait correspondre à des affleurements rocheux, mais il n'en n'existe pas en Baie de Seine sud-orientale, ces derniers n'apparaissant qu'à l'ouest de Ouistreham (plateau du Calvados).



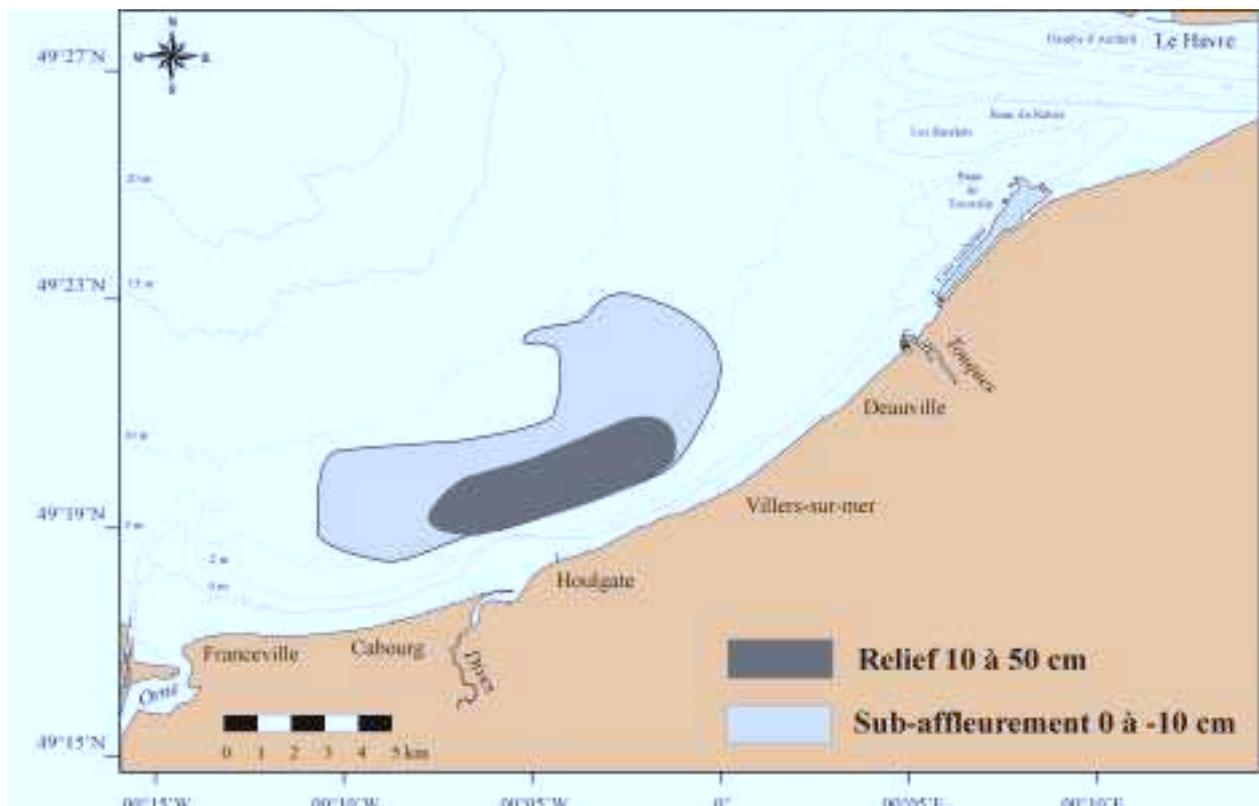
**Figure III-15.** Sonogrammes des différentes formes de mégarides rencontrées en Baie de Seine sud-orientale (localisation sur la figure III-9, p. 97). Le champ de mégarides à proximité de Ouistreham se termine à ses extrémités ouest et est par deux ou trois champs de rides étroites qui pourraient faire penser aux sillons coquilliers observés au large d'Houlgate. Toutefois, ces mégarides qui se surimposent à la couverture sédimentaire ne se situent pas à l'intérieur de dépressions.



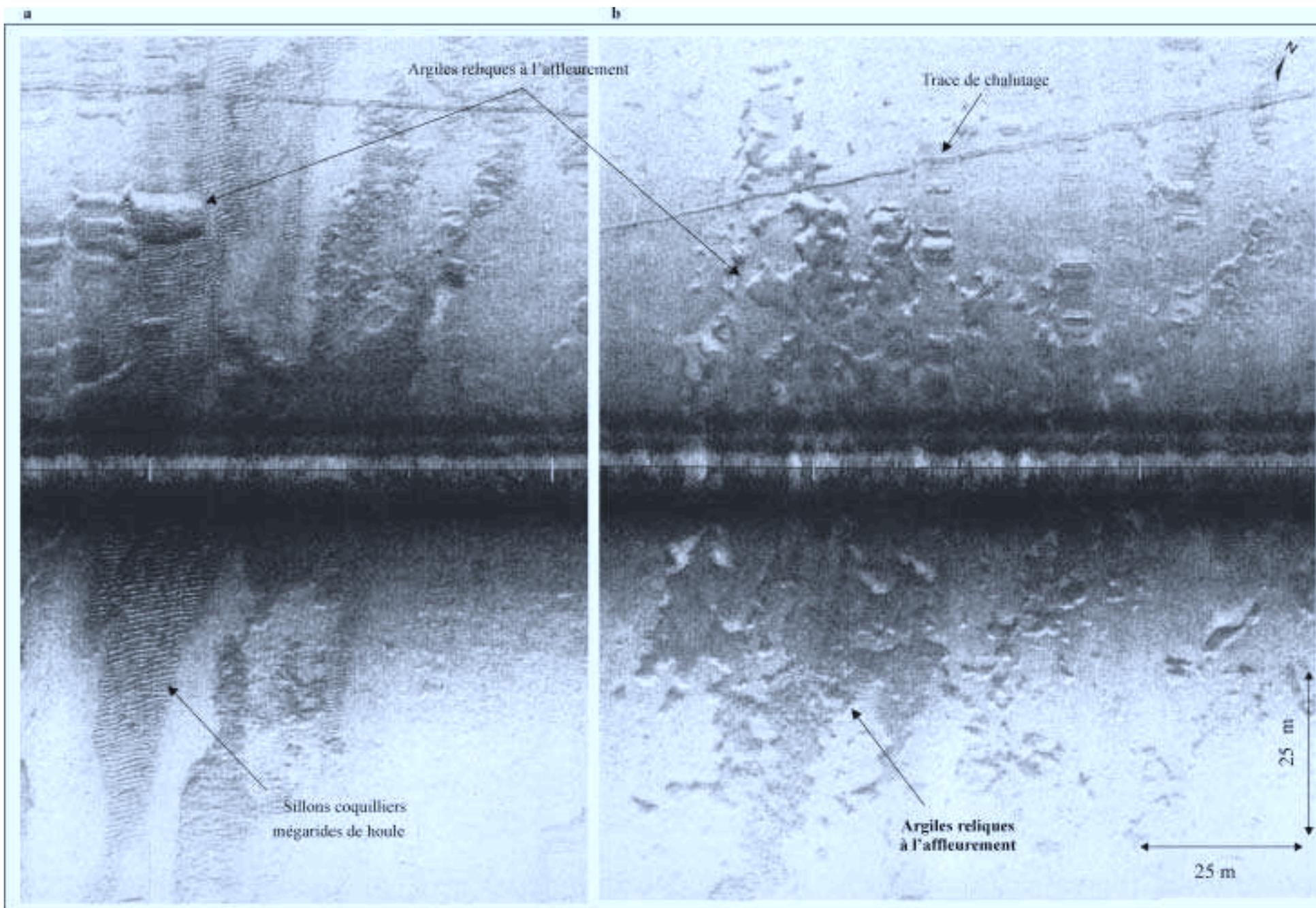
**Figure III-16.** *a et b/ Voiles sableux présents au large de Ouistreham (localisation sur la figure III-9, p. 97). c/ rose de courant de marée sur le site n°1152 au large de Ouistreham: 49°18,6'N et 00°14,4'W. Port de référence du Havre, courants mesurés et marée prédite. N°1152 données EPSHOM, Brest.*

Nous allons montrer ici que ce faciès acoustique est en fait typique de sédiments argileux consolidés qui affleurent sur les fonds subtidaux entre Ouistreham et Deauville.

Les argiles compactes apparaissent sur le secteur où Avoine (1981) avait montré que l'épaisseur de la couverture meuble actuelle était faible voire nulle. Les prélèvements superficiels réalisés lors des missions VASTEDEBA viennent confirmer ces observations. Notre nouvelle couverture sonar permet de proposer une carte précise de l'extension géographique de ces dépôts compacts (*fig. III-18*): les profils sonar les recourent sur des distances telles que leur surface d'affleurement serait de plus de 15 km<sup>2</sup>; l'étude des carottes et bennes montre même une extension probable encore plus grande atteignant 50 km<sup>2</sup>. En fait, la couverture sédimentaire sableuse actuelle augmente d'épaisseur de part et d'autre de la zone des argiles affleurantes qu'elle recouvre de manière progressive vers l'ouest et l'est en direction de Deauville: les affleurements deviennent épars au large de Villers-sur-Mer et disparaissent à l'ouest de Deauville. Vers le large, les argiles reliques sont complètement enfouies sous les sables actuels dès -6 / -7 m CM (*fig. III-18*).



**Figure III-18.** Zone d'affleurement des argiles reliques entre Cabourg et Villers-sur-mer d'après notre interprétation des levés de sonar à balayage latéral (argiles affleurantes) et de l'ensemble des bennes et carottages effectués (argiles subaffleurantes).



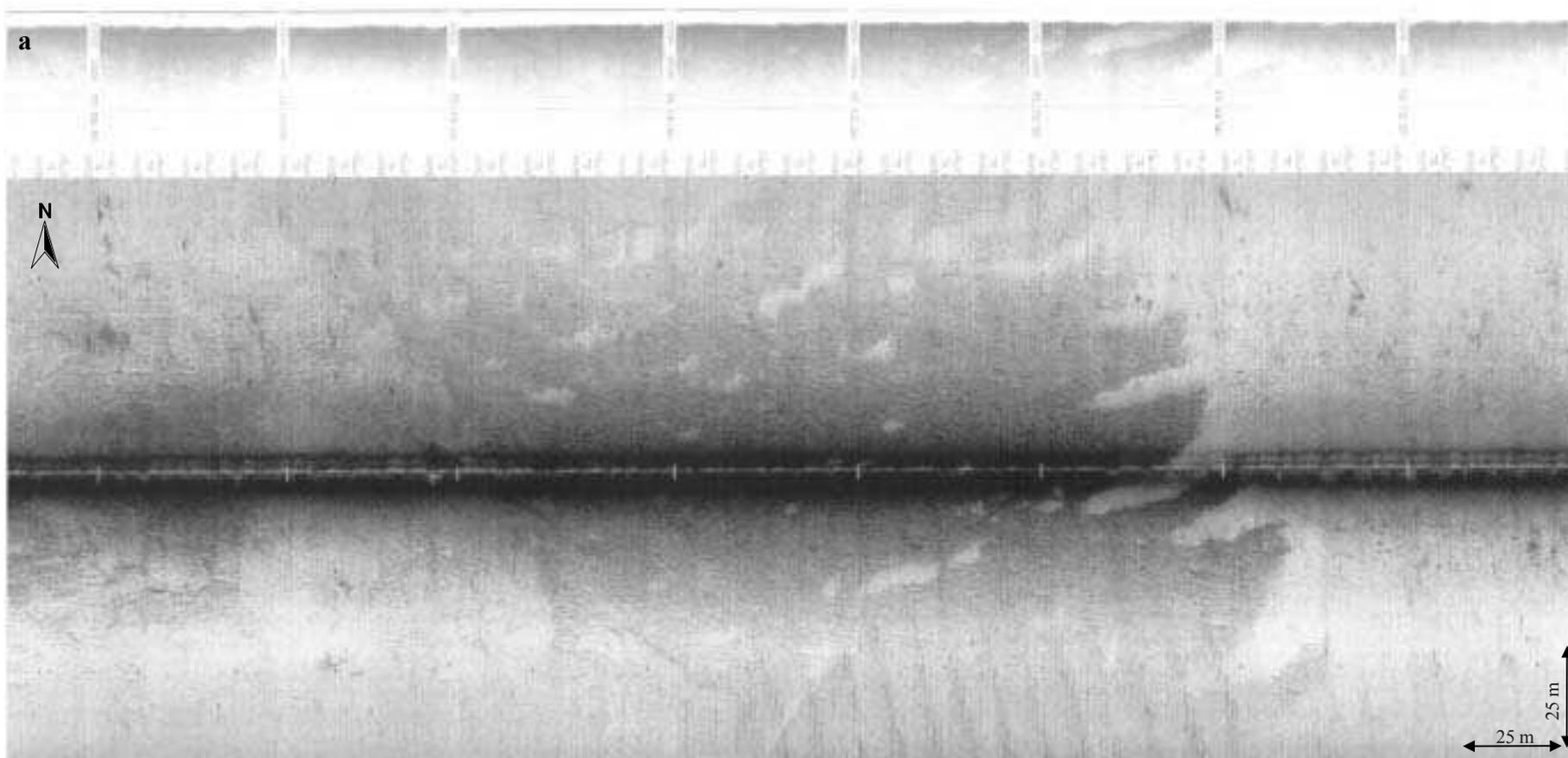
**Figure III-17.** Extrait de sonogrammes présentant l'échofaciès type des argiles compactes affleurant dans les fonds subtidaux au large de Cabourg, localisation sur la figure III-9 (d'après, Garnaud et al., 2002).

### 3.1.3.5 Moulières au large de Deauville

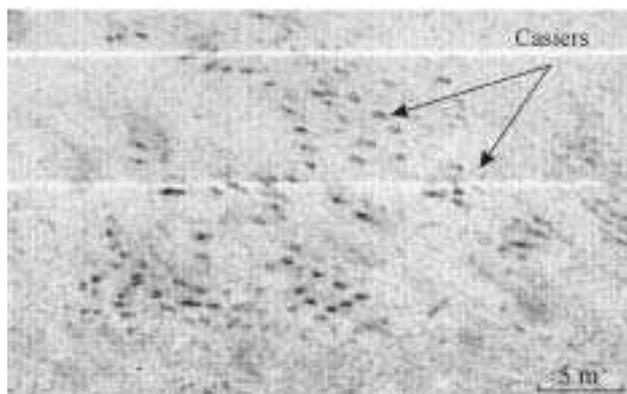
La prospection sonar nous a permis de cartographier une formation particulière de dimension significative au large de Deauville (minimum 0,75 km<sup>2</sup>) à une profondeur de -3 à -4 m CM. A cet endroit, un faciès sombre ressemblant à l'écho acoustique des vasières fossiles apparaît clairement dans un environnement dominé par des sables fins mais avec un relief très peu prononcé (*fig. III-19a*). Des bennes Shipeck et carottes Reineck ont été réalisées pour la calibration de cet écho. Ces prélèvements montrent que les fonds sont composés d'un assemblage de squelettes de balanes centimétriques et de moules juvéniles sur les 10 premiers centimètres (*fig. III-19b*). Le carottier Reineck n'a pas permis de traverser ces dépôts compacts. Les balanes centimétriques présentes sur ces fonds sont du genre *Semibalanus balanoides* (Jean-Claude Dauvin, communication personnelle). Ces organismes vivent habituellement sur des supports naturels (roche) ou artificiels (casiers) de préférence en zone intertidale mais apparaissent parfois en zone subtidale, associés aux moules, comme cela est le cas sur les moulières de Port en Bessin (Ouest de la Baie de Seine). Ces balanes et moules se sont donc mises en place sur un substrat induré. Aucune zone rocheuse n'ayant été cartographiée sur le secteur, il est donc peu probable que ces organismes se soient fixés sur un fond rocheux non répertorié. En effet, toutes les zones à risques pour la navigation (bancs sableux, pointements rocheux, épaves, zones surélevées) restent une priorité dans les missions de reconnaissance des fonds marins par les bateaux océanographiques de la marine nationale. Elles sont systématiquement indexées sur les cartes marines éditées par leur soin. Les anciennes cartes de répartition des faciès sédimentaires de l'embouchure de la Seine (*cf. chapitre II*) montrent des hauts-fonds marins et des bancs sableux au large de Deauville postérieurs à 1854-55. Ces fonds avaient été nivelés en 1880, mais il est possible qu'une partie de ce matériel (galets et graviers) constituant ces constructions sédimentaires serve de substratum à ces mollusques marins. L'analyse structurale de ce corps par sismique réflexion à très haute définition (THR) permettrait probablement de préciser l'origine et la nature des fonds en ce site.

### 3.1.3.6 Traces d'activités anthropiques

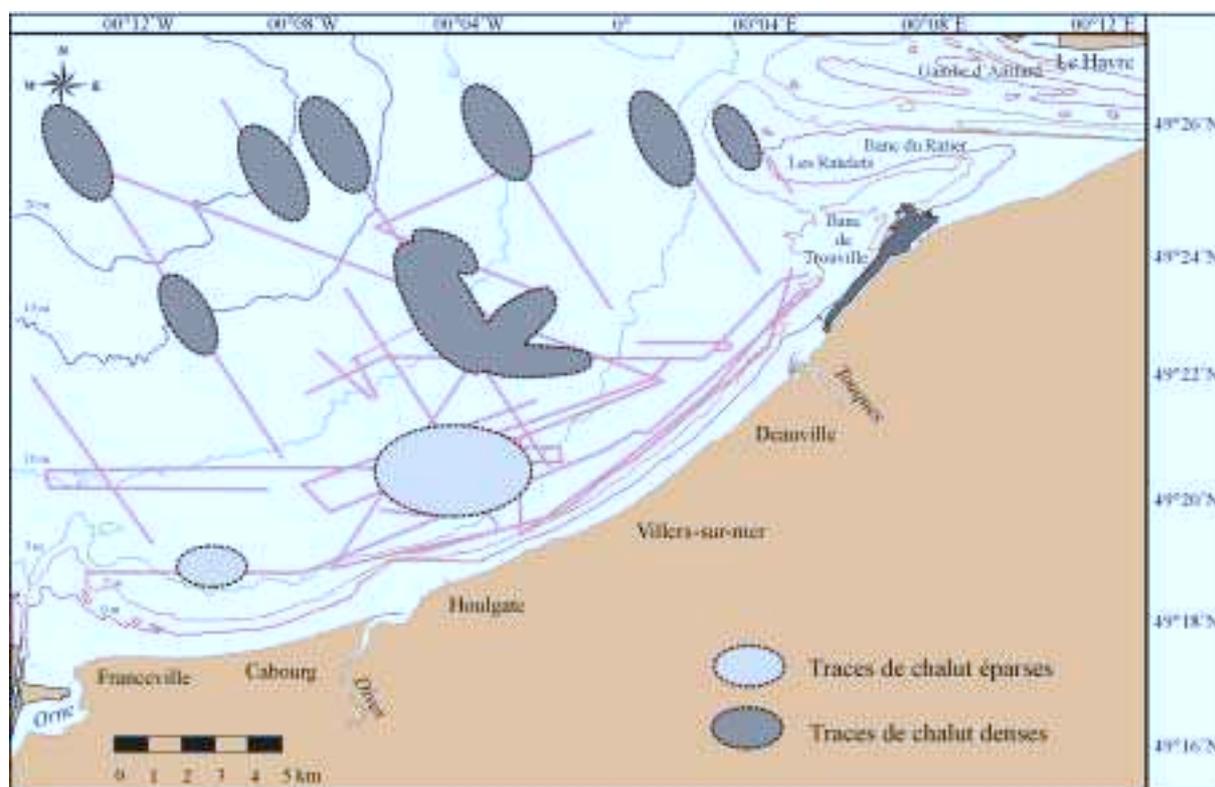
Les fonds marins de la Baie de Seine sud-orientale sont largement affectés par les traces des différentes activités de pêche pratiquées en zone côtière. Certains engins de pêche posés sur le fond, comme les casiers à crustacés, sont détectables et régulièrement observés sur les profils sonar en Baie de Seine orientale (*fig. III-20*). Les traces de chalutages sont très marquées sur le secteur où les sédiments reliques sont présents: les empreintes sont profondes de 10 à 15 cm dans ce faciès, causées par l'enfoncement des lourds panneaux divergents du chalut sur le fond (*fig. III-21a, p. 114*).



Les traces observées reflètent donc l'intensité de l'effort de chalutage sur le fond (fig. III-21a,b). Les sites les plus chalutés se répartissent sur l'ensemble du secteur sud-oriental au nord du parallèle 49°20'N (fig. III-22).

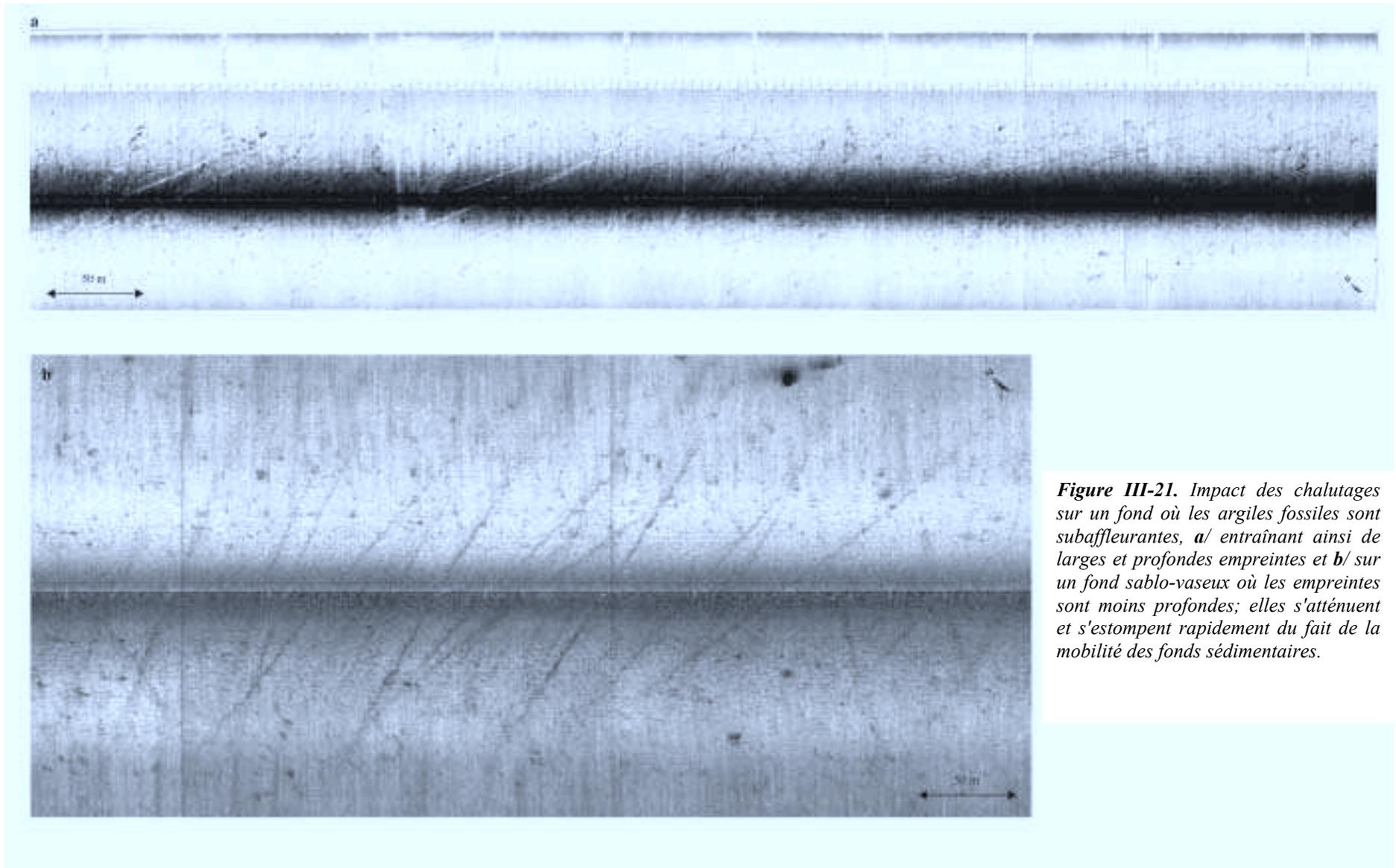


**Figure III-20.** Extrait de Sonogramme montrant des casiers à crustacés posés sur le fond au large de Deauville.



**Figure III-22.** Situation de la distribution des traces de chalut observées à partir des enregistrements au sonar à balayage latéral en Baie de Seine sud-orientale entre 2000 et 2001.

L'activité de chalutage opérée sur le secteur de la vasière Ouest-Gironde est considérée comme une des causes importantes de remise en suspension d'une partie de l'étendue des vasières depuis plusieurs décennies (Lesueur, 1992). Au même titre, l'intensité des chalutages sur les secteurs actuellement convoités pour la pêche en Baie de Seine sud-orientale est probablement responsable d'une augmentation non négligeable de la remise en suspension des sédiments fins. Il est évidemment impossible de quantifier l'importance de ces remaniements d'origine anthropique.



**Figure III-21.** Impact des chalutages sur un fond où les argiles fossiles sont subaffleurantes, **a/** entraînant ainsi de larges et profondes empreintes et **b/** sur un fond sablo-vaseux où les empreintes sont moins profondes; elles s'atténuent et s'estompent rapidement du fait de la mobilité des fonds sédimentaires.

### 3.2 Secteurs envasés de la Baie de Seine orientale

En février-mars 2000 et juin 2001 a été réalisée une série complète de prélèvements du domaine côtier du Calvados. Cette répétition de l'échantillonnage permet d'apprécier les variations spatiales et temporelles de la fraction fine à deux époques distinctes de l'année.

#### 3.2.1 Situation en février-mars 2000

La carte des teneurs en fraction fine présentée en figure III-23 correspond à une situation hivernale. Les vases sableuses et sables vaseux dont la teneur en particules fines reste supérieure à 10 % sont bien représentés. On distingue 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. III-23*). Les différents ensembles envasés correspondent à 5 secteurs distincts:

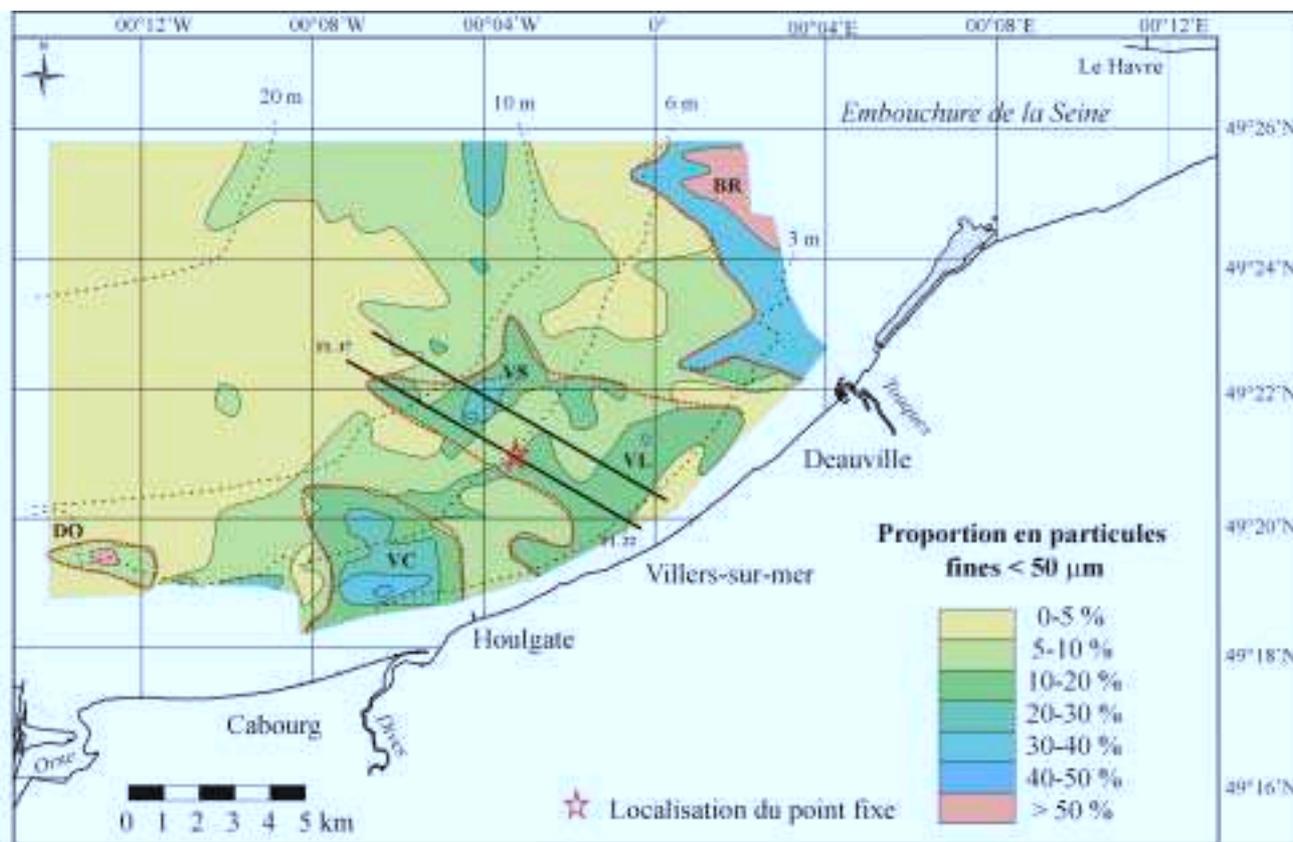
- le banc du Ratier à l'embouchure de la Seine (BR),
- le dépôt de dragage de Ouistreham bien délimité géographiquement (DO),
- un ensemble très envasé au large de Cabourg (VC),
- une vaseuse subtidale (VS),
- une vaseuse littorale (VL).

A l'échelle de la Baie de Seine orientale, les surfaces comportant plus de 5% de particules fines couvrent la moitié de la zone d'étude. Les secteurs contenant moins de 5% de fraction fine apparaissent (1) au-delà d'une profondeur de -10 et -15 m CM, (2) le long des plages du Calvados et (3) dans une zone à l'ouest du banc du Ratier.

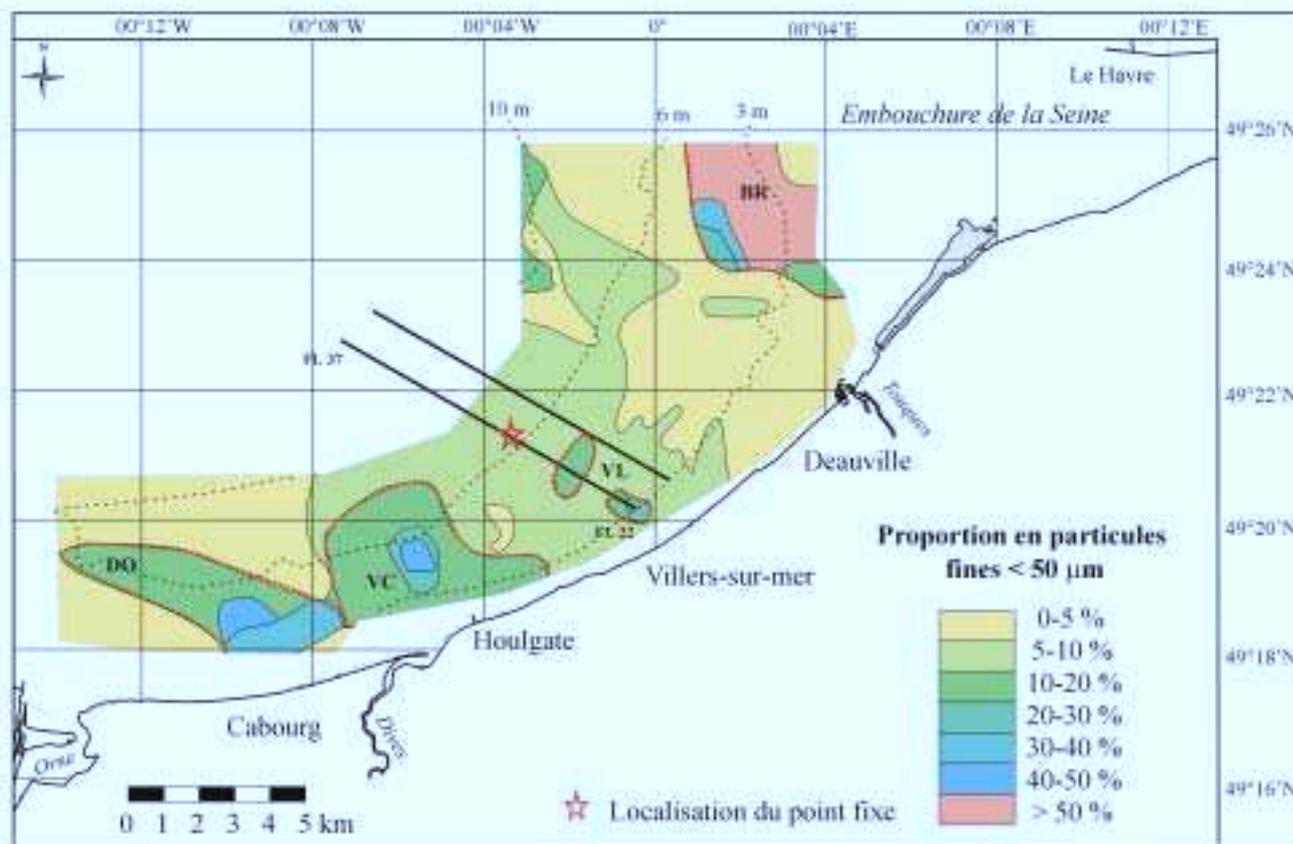
#### 3.2.2 Situation en juin 2001

En juin 2001, la répartition des sédiments fins est complètement différente de la situation précédente, avec des ensembles envasés beaucoup moins bien individualisés (*fig. III-24*):

- le banc du Ratier (BR),
- une tache vaseuse dirigée vers le SE à partir du dépôt de dragage de Ouistreham (DO),
- la vaseuse au large de Cabourg (VC),
- des taches de vase en direction du littoral (VL) au lieu d'une vaseuse subtidale bien individualisée.



**Figure III-23.** Carte de répartition de la fraction fine contenue dans les sédiments de la Baie de Seine sud-orientale en période hivernale (février 2000). DO – Dépôt de dragage de Ouistreham; VC – Vasière Cabourg; VL – Vasière Littorale; VS – Vasière Subtidale; BR – Banc du Ratier.



**Figure III-24.** Carte de répartition de la fraction fine contenue dans les sédiments de la Baie de Seine sud-orientale en période de début d'été (juin 2001). DO – Dépôt de dragage de Ouistreham; VC – Vasière Cabourg; VS – Vasière Subtidale; VL – Vasière Littorale; BR – Banc du Ratier.

### 3.2.3 Caractéristiques des zones envasées

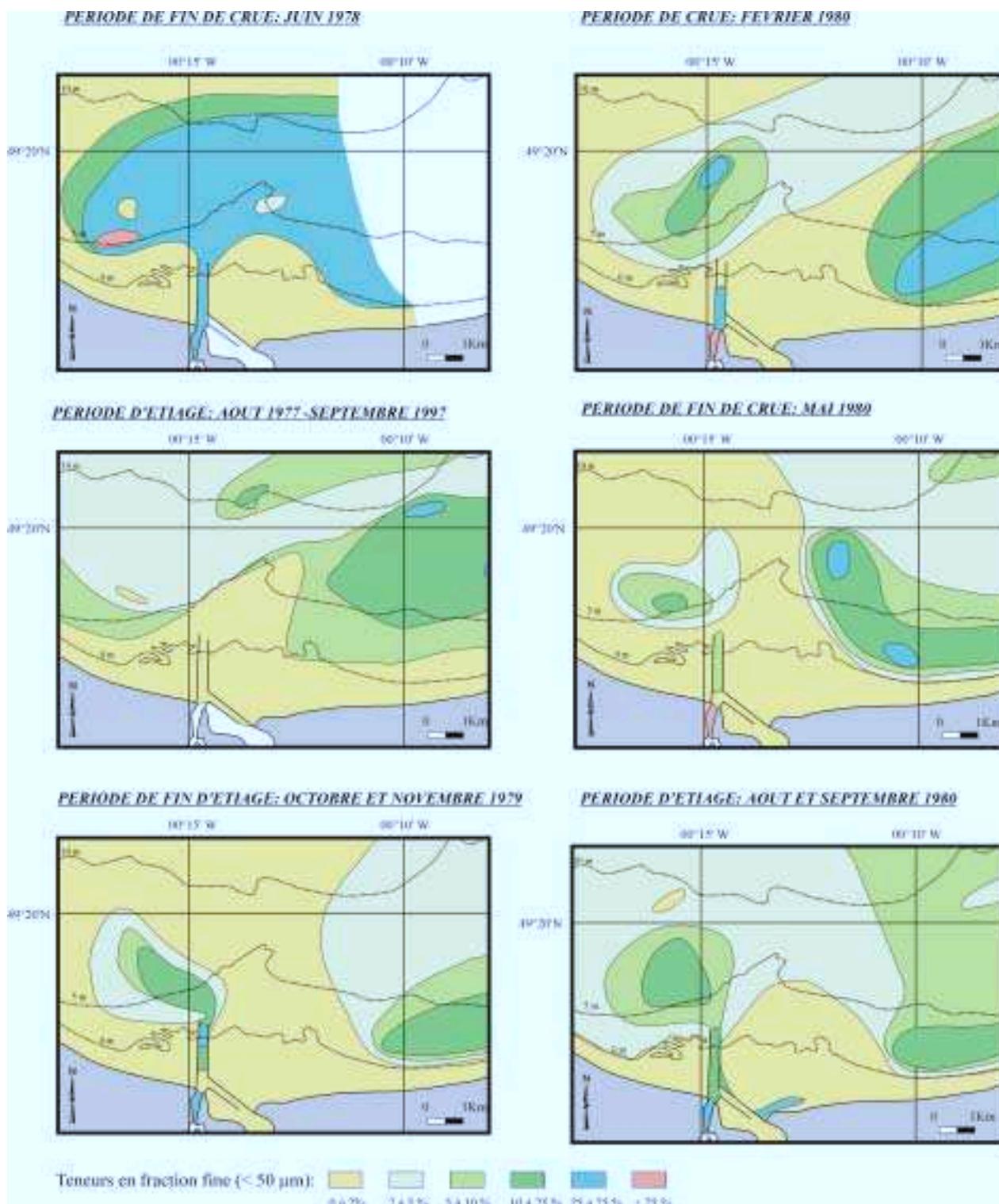
#### 3.2.3.1 Embouchure de l'Orne et dépôt de dragages

Des études ont été réalisées sur l'Orne en 1979-1980 avec un suivi saisonnier de la répartition des dépôts de sédiments fins dans l'estuaire et l'embouchure (Dubrulle, 1982; Avoine *et al.*, 1984a; Dubrulle & Larsonneur, 1984). Il en résulte que les sédiments fins sont expulsés de l'embouchure de l'Orne pendant les crues hivernales en direction du NW et se déposent au large dans les fonds subtidiaux entre -5 et -10 m CM sur une aire relativement restreinte (*fig. III-25*).

La zone du dépôt de dragage de Ouistreham est le seul site où les rejets se font de manière régulière dans la zone d'étude. Hormis les dragages d'approfondissement d'accès au port de Ouistreham qui concernent des sables, les dragages d'entretien concernent à la fois des sédiments sableux et vaseux dont les volumes de rejets annuels atteignent en moyenne 500 000 m<sup>3</sup>. Des mesures sur la dispersion en mer des vases rejetées sur ce site ont été réalisées en 1991 (Avoine, 1992) dans les conditions les plus contraignantes d'un point de vue environnemental, c'est à dire soit à pleine mer et en jusant, soit en conditions de marée de vives-eaux et de mortes-eaux. Les résultats ont montré que les vases se déposent très rapidement sur la zone de clapage et que seuls 5% des produits de dragages restent en suspension dans la colonne d'eau. L'agitation des eaux associée au faible degré de consolidation des vases rejetées entraîne par la suite un remaniement des sédiments vaseux déposés sur le fond et leur rapide dispersion. Cependant, l'étendue du remaniement de ces sédiments fins (> 50% de particules fines) dragués dans l'infrastructure portuaire de Ouistreham reste cantonnée à une aire de 40 000 m<sup>2</sup> autour du point d'immersion en mer (Avoine *et al.*, 1993).

En conclusion d'après cette étude (Avoine, 1992), les sédiments de ce dépôt de dragages restent très localisés sur une aire peu étendue autour du site d'immersion en mer. Le dépôt de dragage de Ouistreham apparaît nettement sur nos deux cartes de répartition des sédiments (*figs. III-23 et III-24*). Les observations réalisées en 2001 (*fig. III-24*, juin 2001) suggèrent une redistribution d'une partie des dépôts de dragages vers le littoral, contrairement à la situation de février 2000 où les sédiments fins sont mieux circonscrits autour du point d'immersion. La participation de ces rejets de dragages dans l'envasement à moyen-terme (pluri-annuel) de la Baie de Seine orientale est difficilement quantifiable. On peut penser qu'elle est néanmoins marginale compte tenu des quantités de matériel mises en jeu et de la méthode de dragage (drague à crapaud) exploitée jusqu'au début de l'année 2002 (drague depuis désarmée). Cependant depuis le changement du système de dragage (drague aspiratrice en marche), un envasement inhabituel des plages situées à l'est de l'estuaire de l'Orne a été observé par les communes du littoral en juin 2002, justifiant des études

particulières demandées par la DDE de Caen<sup>3</sup>. La contribution de ces matériaux de dragage à l'envasement des fonds subtidaux devrait donc être suivie dans les études futures.



**Figure III-25.** Evolution saisonnière de la répartition de la fraction fine (< 50 μm) du sédiment total à l'embouchure de l'Orne (d'après Dubrulle, 1982 et Avoine 1978, données non publiées: étiage 1977 et crue 1978).

<sup>3</sup> Source des informations: appel d'offre de la DDE de Caen, opération de dragage sur le port de Caen-Ouistreham, dossier de demande d'autorisation "Loi sur l'eau" et permis d'immersion.

### 3.2.3.2 Vasières littorale et subtidale

Les sédiments fins échantillonnés face à Villers-sur-Mer sont parmi les dépôts les plus profonds rencontrés sur la zone d'étude, par -8 à -10 m CM de profondeur (*fig. III-23*). La très forte densité de points d'échantillonnage sur ce secteur permet de distinguer ces dépôts formant une vasière, dite subtidale entre -8 et -10 m CM, des sédiments fins plus côtiers composant une vasière dite littorale entre -3 et -6 m CM (*figs. III-23 et III-24*). Les deux sites sont déconnectés l'un de l'autre par une zone moins envasée entre -6 et -8 m CM. La carte de répartition des fractions fines en juin 2001 (*fig. III-24*) montre, par rapport à la situation de février-mars 2000, un large désenvasement du site de la vasière subtidale et une restriction des dépôts plus littoraux, qui se présentent sous la forme de taches vaseuses. C'est ce secteur, caractérisé par des teneurs en fraction fine très évolutives, qui a été retenu pour notre étude saisonnière à haute-fréquence de la variabilité de la sédimentation fine. Les données et résultats obtenus sur ce secteur de référence feront l'objet du paragraphe 4 de ce chapitre.

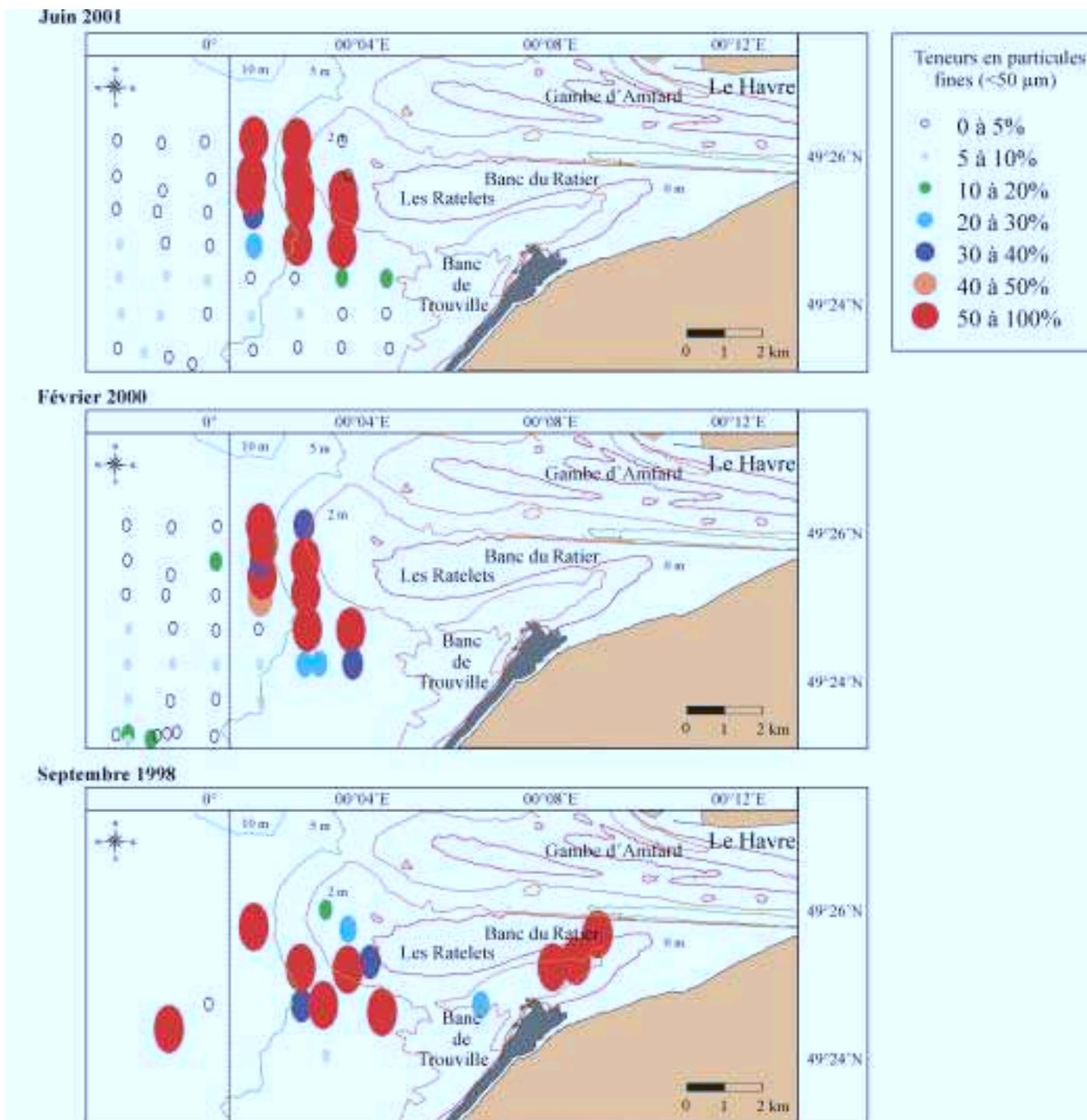
### 3.2.3.3 Banc du Ratier

L'extrémité ouest du banc du Ratier est nettement sous l'influence des apports de la Seine; il constitue ainsi le secteur le plus envasé de notre domaine d'étude. Des vases et vases sableuses assez épaisses (30-50<sup>4</sup> cm) le ceinturent alors que ce banc est couvert dans sa partie supérieure par des sables fins et sables moyens plus vers l'est (*fig. III-7, p. 94*). Une synthèse des prélèvements réalisés entre 1993 et 1996 à l'embouchure de la Seine a permis de délimiter l'extension de ces sédiments vaseux tout le long du flanc du banc, depuis la brèche de la digue du Ratier jusqu'à son extrémité NO (Lesueur & Lesourd, 1999). La succession des missions VASTEDEBA a permis d'échantillonner à deux reprises (février 2000 et juin 2001) des stations situées entre la longitude 00°04'W et le banc du Ratier (*figs. III-23 et III-24*). La comparaison entre nos deux cartes de répartition de la fraction fine montre une constance de l'envasement, malgré les 16 mois qui ont séparé ces deux missions de prélèvements. Il est à noter que le passage latéral entre les sédiments vaseux et les sables fins à moyens de la limite inférieure de la ceinture vaseuse a été cartographié exactement sur le même secteur: le long du méridien 00°01'E. Même si le nombre de points d'échantillonnage au cours des précédentes missions depuis 1993 n'avait pas permis de décrire une couverture toujours homogène et dense, il est remarquable que cette limite de faciès n'ait que peu évolué, toujours située le long du même méridien 00°01'E au cours des 8 ans de suivi (*fig. III-26 et III-26 suite*). A l'intérieur du système envasé de l'embouchure de la Seine, la présence de fraction fine à l'ouest de cette longitude est très rare, quelles que soient les conditions

---

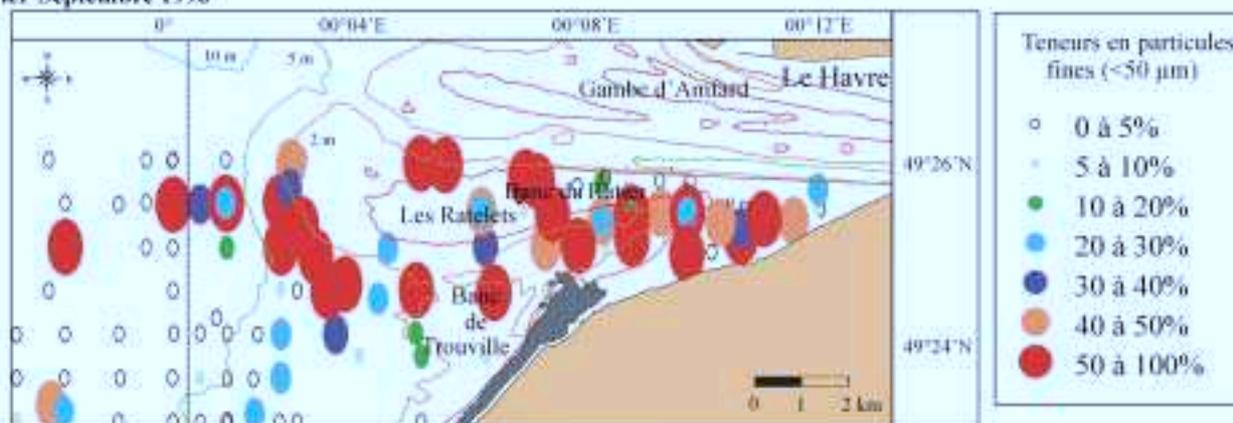
<sup>4</sup> Les carottages réalisés à partir d'un carottier-boîte de l'IFREMER ont montré une épaisseur assez constante de vase molle sur 30 à 50 cm. Dessous, ce sont des sables fins propres qui apparaissent, similaires à ceux retrouvés au NE. Des carottages longs (vibrocarottages) ont été réalisés lors de la mission VASTEDEBA IV et font l'objet d'une étude approfondie dans le cadre d'une thèse sur le thème de la construction du prisme sableux de l'embouchure de la Seine (N. Delsinne).

d'échantillonnage (saison, débit fluvial, coefficient de marée,...). Ce secteur est soumis à une agitation (Le Hir & Silva Jacinto, 2001) telle que la balance entre les apports et la dynamique du milieu empêche tout dépôt pérenne de vase.

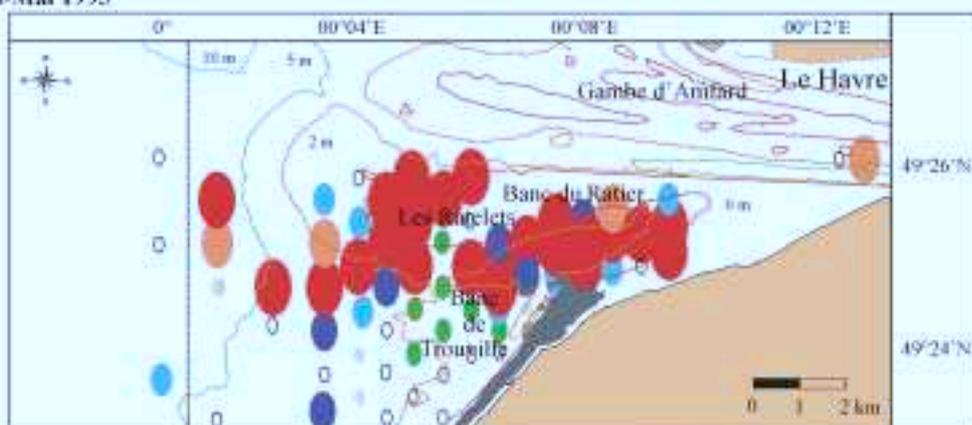


**Figure III-26.** Distribution de la fraction fine contenue dans les sédiments superficiels à l'embouchure de la Seine entre septembre 1998 et juin 2001. Méridien 00°01'E en pointillés.

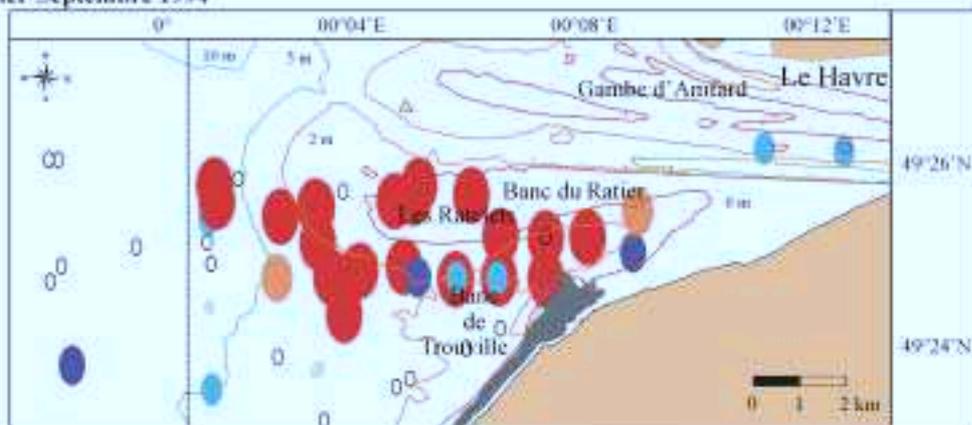
Février-Septembre 1996



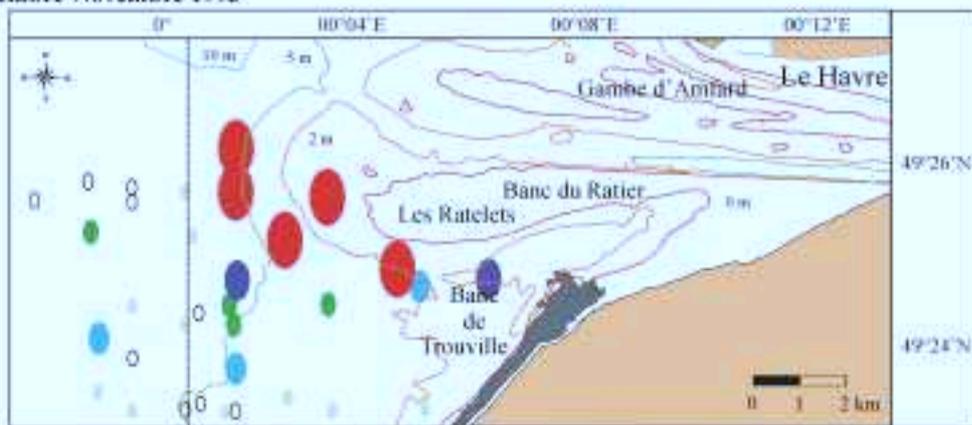
Avril-Mai 1995



Février-Septembre 1994



Septembre-Novembre 1993



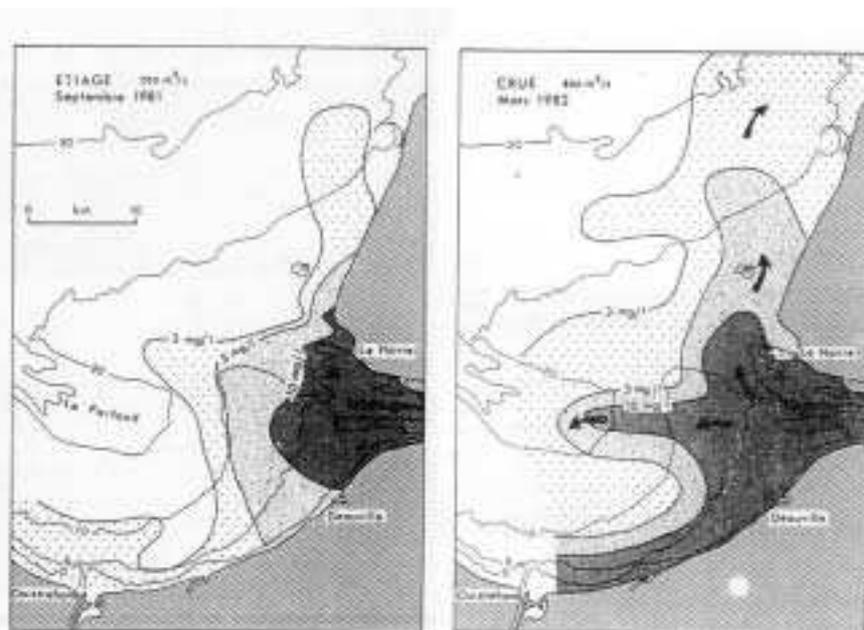
*Figure III-26 (suite). Distribution de la fraction fine contenue dans les sédiments superficiels à l'embouchure de la Seine entre février-septembre 1996 et septembre-novembre 1993. Méridien 00°01'E en pointillés.*

#### 4. Suivi saisonnier de l'évolution de l'envasement de la couverture sédimentaire en Baie de Seine sud-orientale

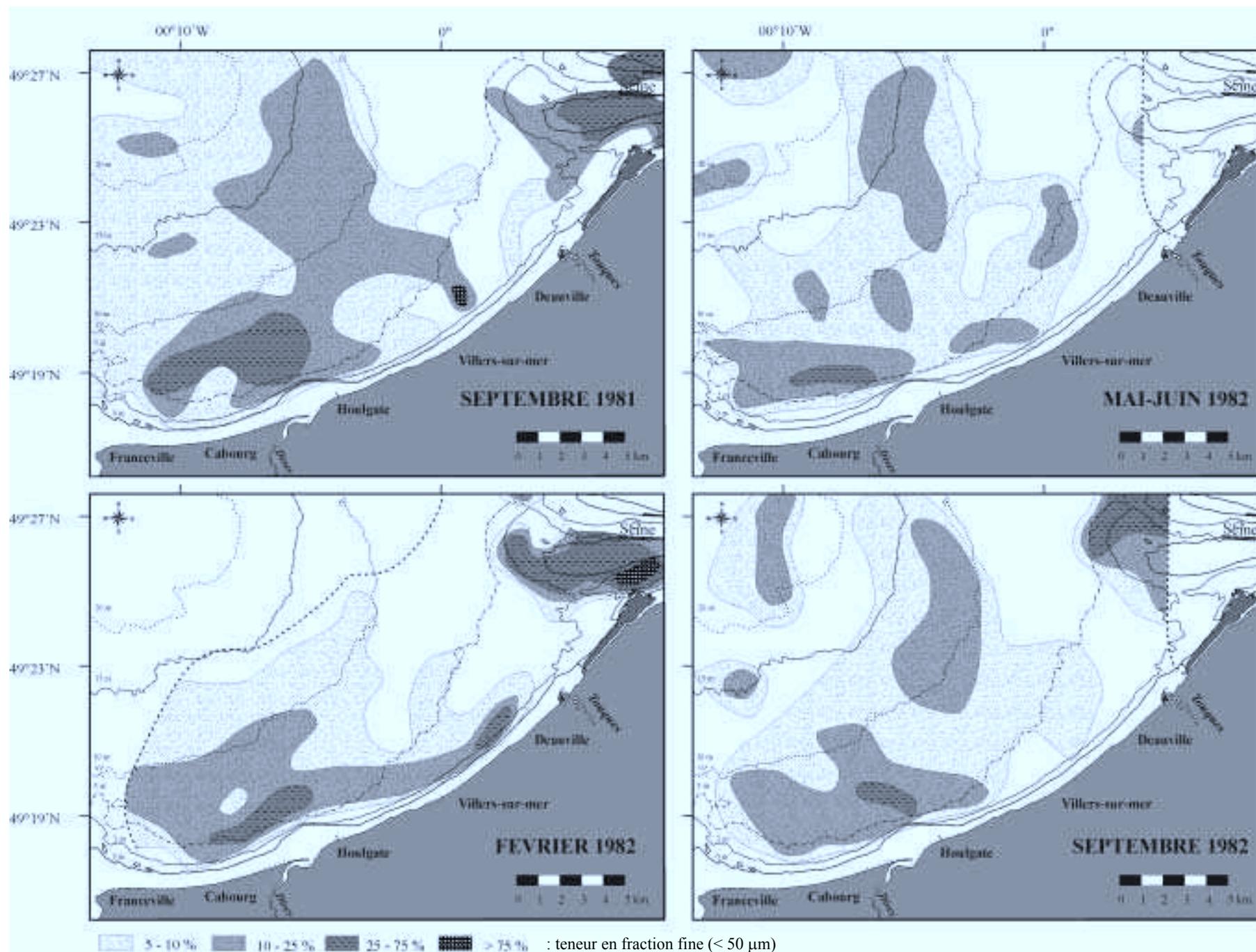
##### 4.1 Rappels des connaissances antérieures: variations saisonnières des sédiments fins en 1981-1982

###### 4.1.1 Résultats

Les travaux d'Avoine (1981; 1994) et Larsonneur et Avoine (1981) avaient fourni des informations détaillées sur les variations saisonnières de la couverture sédimentaire entre l'embouchure de la Seine et la Baie de Seine orientale entre septembre 1981 et septembre 1982 (*fig. III-27*). Ainsi, ils montraient que les dépôts fins avaient une extension maximale dans l'embouchure de la Seine durant l'hiver 1981 tandis que l'envasement des fonds au large du Calvados était plus important plutôt au cours de l'étiage en 1982, en période de calme hydrodynamique. Ce résultat a été mis en relation avec d'une part les apports fluviaux sous forme de MES lors des crues et d'autre part avec la remise en suspension de ces sédiments sous l'action des houles de tempête. Durant la saison hivernale, en période de crue, des quantités importantes de MES sont expulsées en mer. Un suivi hydrosédimentaire avait permis de montrer lors de la crue de février-mars 1982 (*fig. III-28*) l'apport d'eau saumâtre très turbide vers le nord et l'ouest (Larsonneur & Avoine, 1981; Avoine *et al.*, 1984a). Cette crue avait conduit à un envasement des fonds dans l'embouchure de la Seine de part et d'autre du chenal principal. A la fin de la période de crue, l'envasement à l'embouchure de la Seine régresse du fait des houles de tempête qui remobilisent ces dépôts temporaires. Ainsi, ces vases remises en suspension sont dispersées vers les installations portuaires et plus au large, vers le Parfond. Au printemps, les sédiments fins sont redéplacés en direction des côtes du Calvados. C'est ainsi que les fonds subtidaux proche du Calvados se trouvent plus envasés en période d'étiage.



**Figure III-28.** Répartition des MES dans les eaux de surface de la partie orientale de la Baie de Seine dans les conditions les plus favorables à leurs expulsions (marée de vives-eaux et basse mer) en période d'étiage (septembre 1981) et de crue (mars 1982) (Avoine *et al.*, 1986).



**Figure. III-27.** Evolution saisonnière de la couverture sédimentaire dans la partie orientale de la Baie de Seine (modifié d'après Avoine, 1994). Carte de septembre 1981: Larssonneur et Avoine, 1981. La ligne pointillée délimite la zone de cartographie.

## 4.1.2 Commentaires

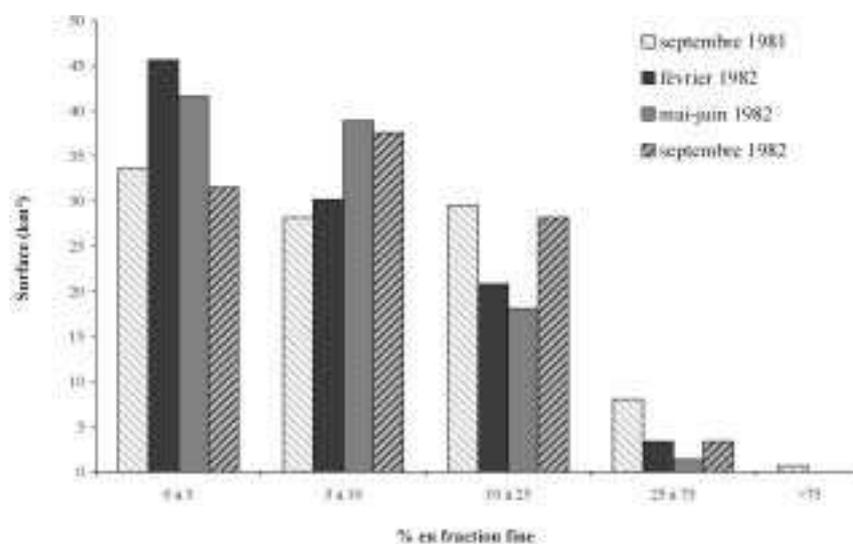
Les quatre cartes du suivi annuel (*fig. III-27*) présentent au départ un état du secteur d'étude (septembre 1981) pour lequel les sédiments avec des teneurs en fraction fine supérieure à 5% représentent plus de 80% du domaine étudié. La cartographie des sédiments fins réalisée en février 1982, au moment d'une crue importante de la Seine, montre un secteur côtier beaucoup plus envasé à la côte avec une ceinture vaseuse entre le domaine intertidal et jusqu'à -10 m CM, le long de la côte entre Franceville et Deauville. Cette ceinture est sous l'emprise de la masse d'eau turbide identifiée lors des crues intenses (*fig. III-28*) et la décantation d'une partie de cette plume turbide est certainement responsable de l'envasement côtier observé. A l'embouchure de la Seine, l'extension des dépôts fins est peu différente de la situation de septembre 1981. En mai-juin 1982, la ceinture vaseuse se divise en deux parties, la zone envasée au large de Deauville disparaissant. Des taches d'ensembles plus envasés sont présentes dans le domaine plus profond non prospecté en février 1982. En septembre 1982, la couverture a surtout changé près de l'embouchure de la Seine (*fig. III-27 et tabl. III-2*).

Dans les quatre situations présentées, j'ai réalisé une estimation des teneurs en fraction fine à partir de ces cartes. La période hivernale de mi-juin 1982 est, sur la base du calcul des aires de distribution de la fraction fine, la situation la moins envasée. Mais l'échantillonnage n'ayant pas été rigoureusement le même au cours des missions, les pourcentages moyens proposés sont entachés d'une erreur sur les valeurs, de l'ordre de 2 à 3% (*tabl. III-2*).

Pourcentage de la fraction fine (< 50 µm) contenue dans les sédiments superficiels	Septembre 1981		Février 1982		Mai-Juin 1982		Septembre 1982	
	Surface		Surface		Surface		Surface	
	km <sup>2</sup>	%						
0 à 5	50	33,6	68	45,6	62	41,6	47	31,5
5 à 10	42	28,2	45	30,2	58	38,9	56	37,6
10 à 25	44	29,5	31	20,8	27	18,1	42	28,2
25 à 75	12	8,1	5	3,4	2	1,3	5	3,4
>75	1	0,7	0	0	0	0	0	0
<b>Pourcentage moyen de la fraction fine</b>	12,7		8,7		7,8		10,2	

**Tableau III-2.** Evolution de la distribution des sédiments fins (< 50 µm) en Baie de Seine orientale entre septembre 1981 et septembre 1982 (calcul des aires établis à partir des cartes d'Avoine, 1994). Dans le calcul des aires de répartition, la même coupure géographique a été choisie, éliminant à la fois la zone la plus interne de l'embouchure de la Seine et la zone en direction du Parfond (limite sur la carte de février 1982).

Ainsi, il semble délicat, en considérant cette seule année de suivi de 1981-1982, de conclure à une évolution saisonnière où les envasements seraient plus marqués en domaine subtidal en période d'étiage. L'histogramme proposé en figure III-29 montre que les surfaces envasées avec des teneurs en fraction fine comprises entre 10-25% et 25-75% sont plus importantes pour les mois de septembre. Par contre, les surfaces envasées correspondant à la classe 5-10% évoluent de manière croissante indépendamment des saisons, reflétant ainsi l'envasement à plus long-terme de ces fonds marins. Si on considère le seul secteur situé entre Houlgate et Villers-sur-mer (vasières subtidale et littorale, *figs. III-23 et III-24*), on observe sur les cartes d'Avoine de 1981-1982 une situation qui apparaît comme plus envasée en septembre et surtout février 1982. En fait, pour étudier la variabilité des dépôts sur une zone donnée, il est nécessaire de définir exactement le secteur d'étude et de procéder à un échantillonnage rigoureusement identique au cours des missions. Dans notre étude, la Baie de Seine sud-orientale a été définie dans son ensemble, avec les limites géographiques suivantes: au sud de la latitude 49°26'N, et entre Ouistreham (00°15'W) et Deauville-sur-Mer (00°05'E) en longitude.



**Figure III-29.** Histogramme des surfaces envasées en fonction des teneurs en fraction fine en Baie de Seine sud-orientale.

#### 4.2 Données nouvelles sur la couverture sédimentaire (Programme PNEC Baie de Seine et Seine-aval II): variations saisonnières et pluri-annuelles sur la zone atelier

##### 4.2.1 Variations pluriannuelles constatées entre 1995 et 2001

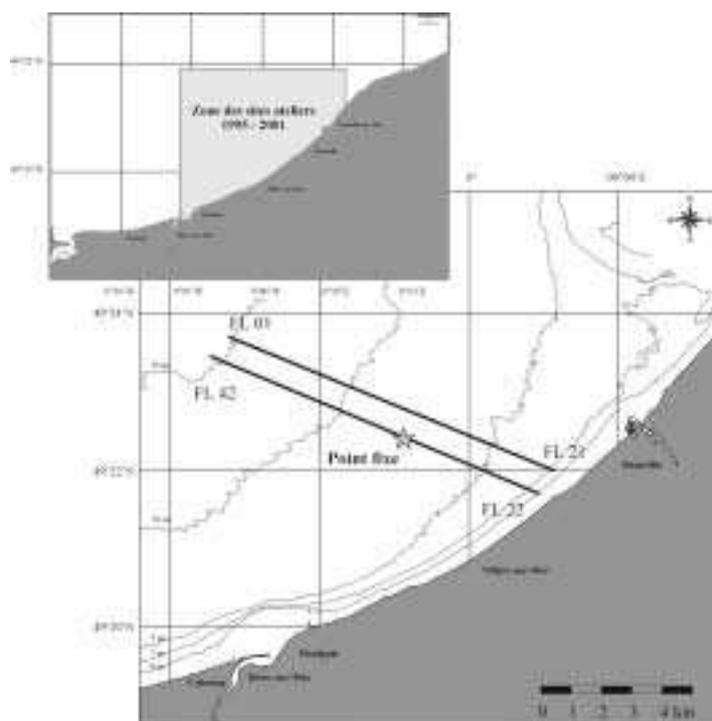
L'évolution pluri-annuelle (ou à moyen terme) du domaine d'étude est étudiée ici par la comparaison de deux cartes datant respectivement de 1995 et 2000 (*fig. III-30*). Afin de se rapprocher des mêmes conditions hydrologiques, la mission de 2000 s'est déroulée au cours du même mois d'hiver (février 1995 et 2000) et par des débits analogues de la Seine (*fig. III-3, p. 90*). De même, les points d'échantillonnage ainsi que la méthode de prélèvement

(benne Shipec) ont été rigoureusement identiques pour les deux missions.

En 1995, l'envasement correspondait à des placages discontinus sur des sables dépourvus de fraction fine alors qu'en 2000 l'envasement était plus général sur le site (*fig. III-30*). Entre ces deux situations, la moyenne des teneurs en pélites sur l'ensemble de la zone d'étude est passée de 3% en 1995 à 35% en 2000. Ainsi, on constate un envasement notable qui se développe entre Cabourg et Deauville au cours de cette période 1995-2001. C'est cette situation d'envasement généralisé qui prédomine actuellement dans les fonds subtidaux proches des côtes du Calvados. Toutefois, la valeur moyenne de 35% de fraction fine en 2000 correspond à une situation "instantanée" de l'envasement au cours du mois de février qui s'inscrit dans une évolution à plus petite échelle de temps, saisonnière, présentée dans le paragraphe suivant.

#### 4.2.2 Variations saisonnières et pluri-annuelles: la zone atelier des radiales FLUXMANCHE

Dans le cadre du suivi spatio-temporel de l'évolution de la fraction fine des sédiments, deux radiales ont été choisies comme zone atelier représentative des variations à haute-fréquence de la sédimentation pélitique en Baie de Seine sud-orientale (*fig. III-31*). Les données sur la couverture sédimentaire de février 2000 et juin 2001 (*figs. III-23 et III-24*) montrent que le secteur le plus sensible aux fluctuations de la nature des fonds est recoupé par les radiales choisies. Le suivi de l'évolution de ces fonds subtidaux a été effectué grâce à la répétition de l'échantillonnage par différentes conditions hydrodynamiques, entre 1998-1999 (BENTHOSEINE) et 2000-2001 (VASTEDEBA). Les prélèvements réalisés en 1995 (FLUXMANCHE) servent de point initial ("d'état zéro") de notre étude comparative de l'évolution des dépôts.



**Figure III-31.** Localisation des radiales suivies (FL01-FL21 et FL42-FL22) et du point fixe sur la zone atelier de la Baie de Seine sud-orientale pour l'étude des variations à haute fréquence de la sédimentation fine.

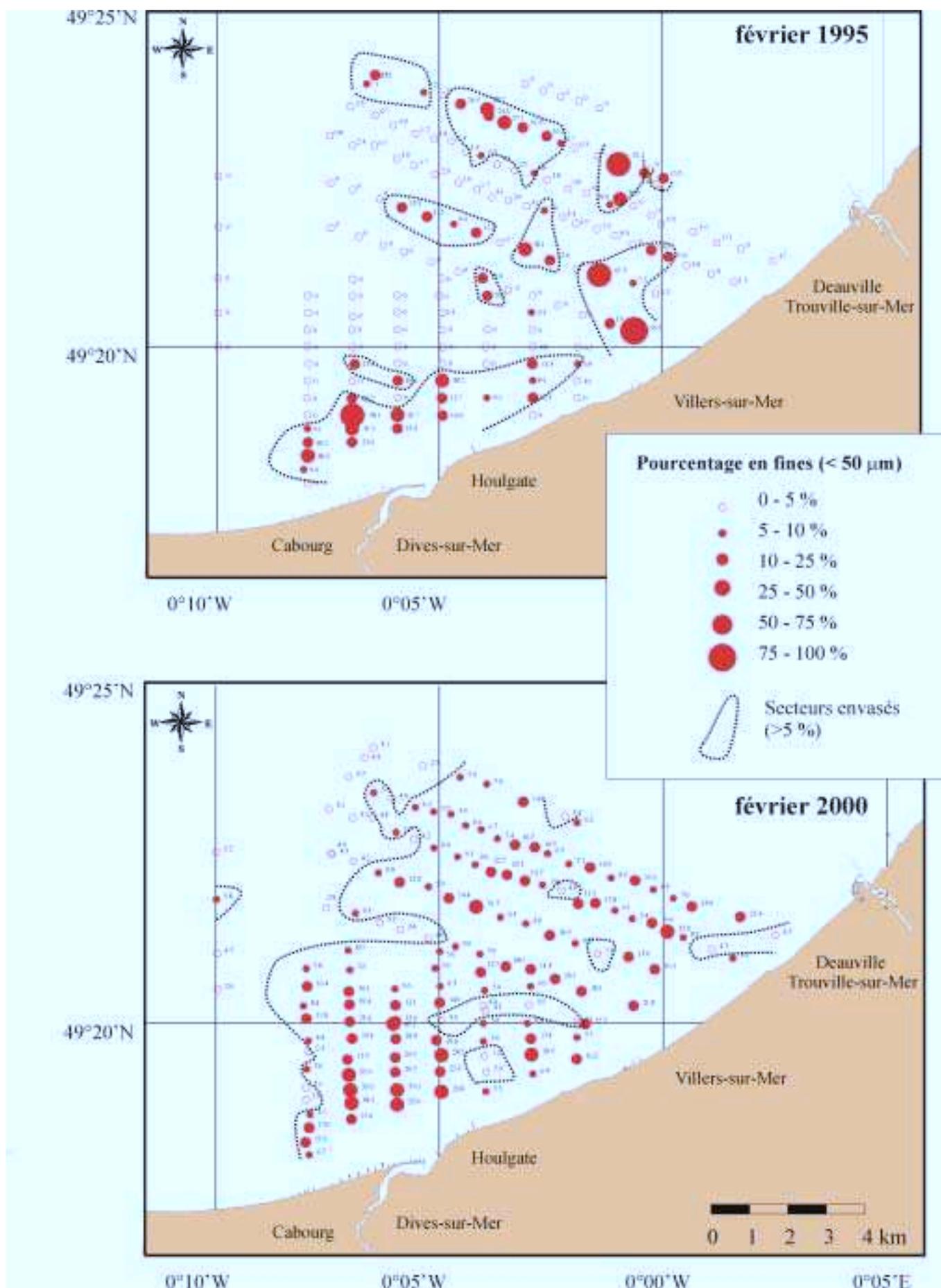
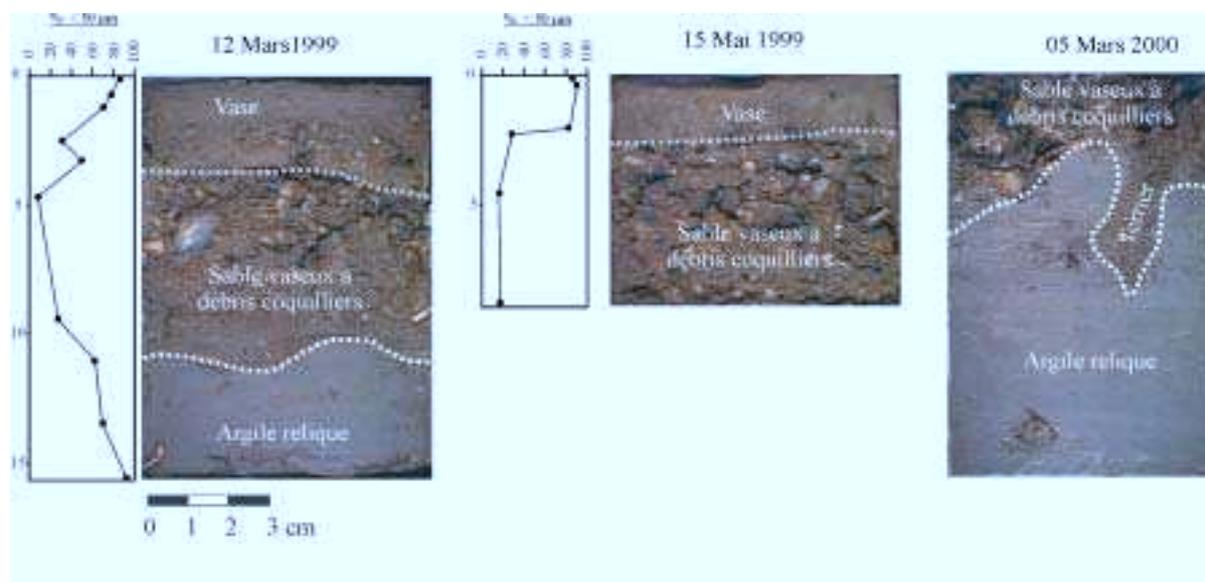


Figure III-30. Variabilité temporelle de la fraction fine contenue dans les sédiments superficiels de Baie de Seine sud-orientale entre 1995 et 2000 sur le même secteur d'étude (modifié d'après Garnaud et al., 2002).

#### 4.2.3 Evolution spatio-temporelle de la vaseière temporaire subtidale sur la zone atelier

La synthèse des résultats obtenus sur l'évolution des sédiments fins le long de la radiale FL22-FL43 est présentée dans le tableau III-3. L'évolution saisonnière des sédiments fins sur l'ensemble des radiales depuis septembre 1998 est illustrée sur la figure III-32. Ce suivi saisonnier de l'évolution de la fraction fine du sédiment le long des deux radiales montre une forte variabilité de la distribution des dépôts fins.

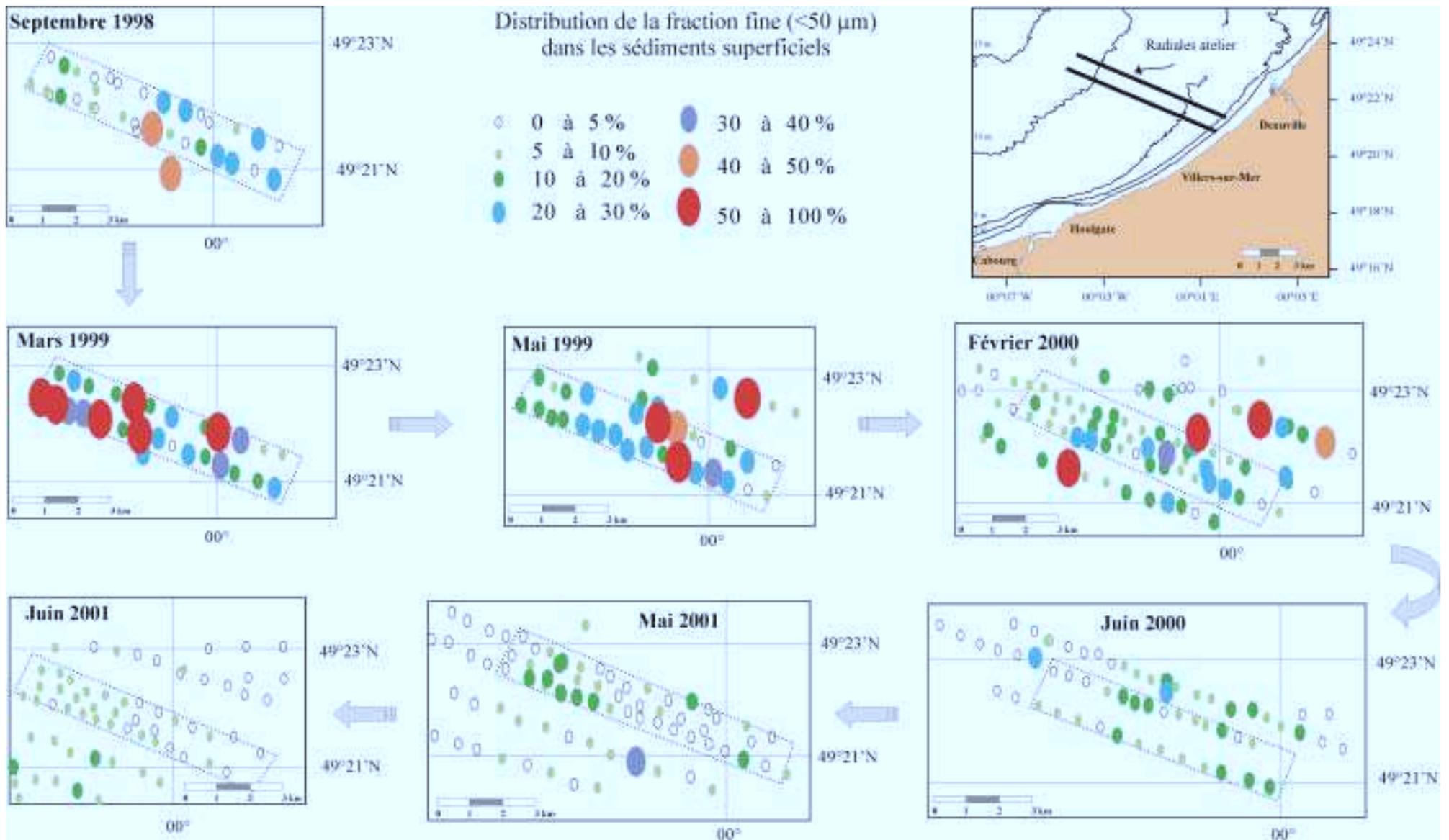
Au cours des neuf campagnes, l'envasement maximum a été constaté au mois de mars 1999 : moyenne des teneurs en particules fines de l'ordre de 25% sur l'ensemble des radiales, contre 6% en janvier 1995. Des placages superficiels de vase fluide (crème de vase) atteignant localement cinq centimètres d'épaisseur furent échantillonnés en plusieurs points en mars 1999 (*fig. III-33*). Ces placages, reconnus en période de fin d'hiver, ne furent pas entièrement préservés au cours des mois suivants, en raison de l'agitation de la mer sur ces petits fonds subtidaux. Ainsi, en mai 1999, les dépôts préférentiels de vase semblaient situés plus près du littoral (*fig. III-32*). Une autre partie des sédiments fins temporairement déposés a ensuite contribué à la reconstitution du stock sédimentaire intra-estuarien de la Seine sous l'asymétrie des courants de marée (prédominance du flot), phénomène particulièrement marqué en période d'étiage et de vives-eaux conjuguées (Lesourd, 2000). En février 2000 (*fig. III-32, tabl. III-3*), 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 les plus au large. Depuis mai 1999, nous n'avons pas observé en Baie de Seine orientale de véritable crème de vase d'épaisseur significative ( $\geq 1$  cm) en placage sur le sédiment superficiel (*fig. III-32, tabl. III-3*).



**Figure III-33.** Exemple d'enregistrement des variations verticales de la couverture sédimentaire par carottages courts de type Reineck suivi sur le site du point fixe en mars 1999, mai 1999 et mars 2000.

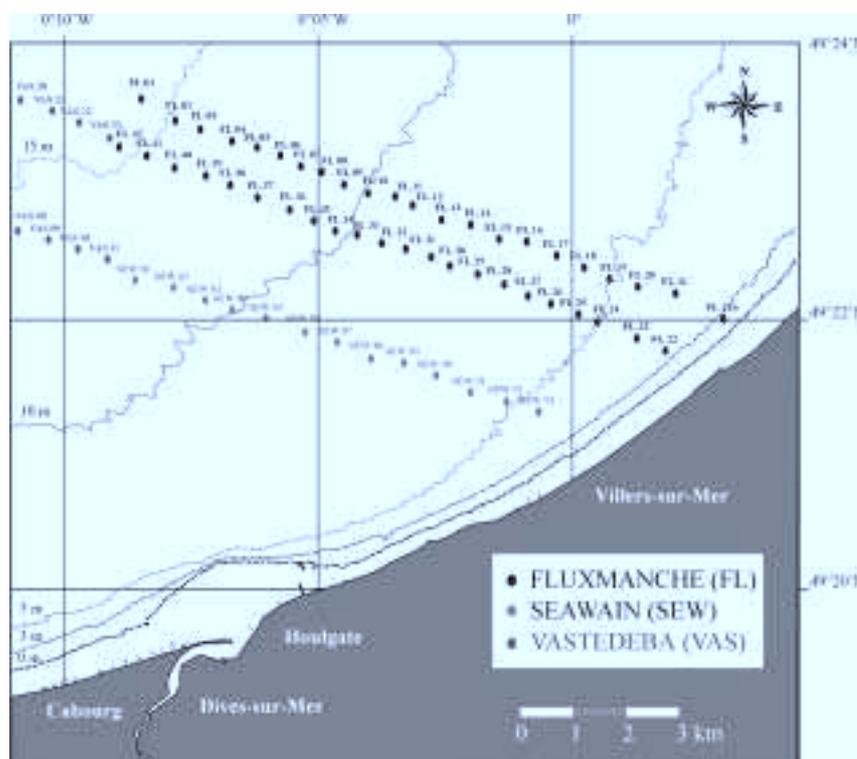
Missions	Commentaire sur la répartition des surfaces envasées	% moyen de fraction fine
<i>Septembre 1998</i>	L'envasement des radiales n'est pas très prononcé à l'exception des points situés les plus à la côte (FL24 et FL25: 28% et 21 %). Les plus fortes valeurs en particules fines, situées donc de la côte, diminuent progressivement avec la profondeur d'eau. Elles sont de l'ordre de 5 à 6 % au large.	10,1% 15 sites analysés
<i>Mars 1999</i>	Des dépôts vaseux fluides (crème de vase) s'étendent à la surface du sédiment superficiel des fonds de la Baie de Seine orientale (fig. III-33). L'envasement est important sur l'ensemble de la radiale. Cependant, il est plus marqué sur les sites les plus au large, avec des secteurs atteignant 30 % à 60 % de fraction fine.	24,5% 16 sites analysés
<i>Mai 1999</i>	Cette mission réalisée 2 mois après celle de mars 1999 présente un état des lieux assez analogue à la mission précédente bien que les sites les plus envasés (60%) se situent cette fois-ci plus près de la côte. Vers le large, les sédiments contiennent entre 10 à 20% de fraction fine.	20,1% 16 sites analysés
<i>Février 2000</i>	Les sites d'envasement sont bien individualisés. Une vasière littorale (-3 à -6 m CM) analogue à la situation de septembre 1998 s'est développée légèrement décalée vers le large. Une vasière dite subtidale se constitue entre FL31-FL37 (10 à 20%) puis le taux d'envasement s'homogénéise à 5% vers les points situés les plus au large.	11,5% 15 sites analysés
<i>Juin 2000</i>	La vasière subtidale est marquée par un taux d'envasement moindre (7-13%) et un point singulier (FL 40, 25%). Le domaine très proche du littoral n'a pas pu être échantillonné à cette époque.	7,3% 11 sites analysés
<i>Mai 2001</i>	Sur l'ensemble de la radiale, seule la vasière subtidale est présente (15%), situation analogue à celle de juin 2000.	6,4% 16 sites analysés
<i>Juin 2001</i>	L'envasement est très peu marqué sur l'ensemble de la radiale, aucune vasière ne s'individualise. Les sites les plus au large n'ont pu être échantillonnés. Les valeurs sont comprises entre 5 et 8% de fraction fine.	6,2% 14 sites analysés

**Tableau III-3.** Récapitulatif des situations saisonnières observées en Baie de Seine sud-orientale le long de la radiale FLUXMANCHE FL22-FL37 entre septembre 1998 et juin 2001 et calcul de l'envasement moyen des sédiments superficiels.



Les quantités de sédiments fins présentent sur le secteur de la vasière temporaire subtidale en mars 1999 peuvent être estimées à partir des points situés sur les 2 radiales de référence (*fig. III-32*). Ainsi, dans l'hypothèse d'un dépôt de vase superficielle continu et homogène de 3 à 5 cm d'épaisseur et une masse volumique sèche apparente de ces sédiments de  $1,2 \text{ t.m}^{-3}$ , la masse de sédiments vaseux sur le seul secteur représenté par les radiales est estimée entre 150 000 et 250 000 tonnes. Toutefois, ces valeurs restent sous-estimées puisqu'elles ne concernent qu'un secteur restreint, celui des radiales, aucun prélèvement n'ayant été réalisé en mars 1999 sur les sites adjacents. Même si on considère que la majeure partie des dépôts observés en mars 1999 avait été dispersée ou mélangée au sédiment, la surface totale envasée en février 2000 couvre une surface 2 à 3 fois plus importante que la seule zone des radiales. En faisant l'hypothèse qu'en mars 1999 cette surface était probablement envasée sur une aire comparable à celle de février 2000, la masse totale peut être majorée et impliquer une masse de l'ordre de 300 000 à 750 000 tonnes.

Les différentes missions VASTEDEBA ont également permis d'initier de nouvelles radiales afin de compléter l'étude de l'évolution spatio-temporelle des sédiments fins sur des secteurs voisins aux radiales FLUXMANCHE. Ainsi, sur une radiale initiée plus à l'ouest en février 2000 (*fig. III-34*), le pourcentage de sédiments fins augmente en direction de la côte avec un envasement pérenne indépendant des saisons situé au large de Cabourg (*fig. III-35*). Toutefois, les teneurs en pélites sont souvent inférieures à la situation de février 2000. La présence de cet envasement marqué, peu sensible aux évolutions annuelles et pluri-annuelles au large de la Dives, fera l'objet d'une étude détaillée dans ce chapitre (*cf. § 6.1.1.2*).



**Figure III-34.** Position des radiales au large de Villers-sur-Mer.

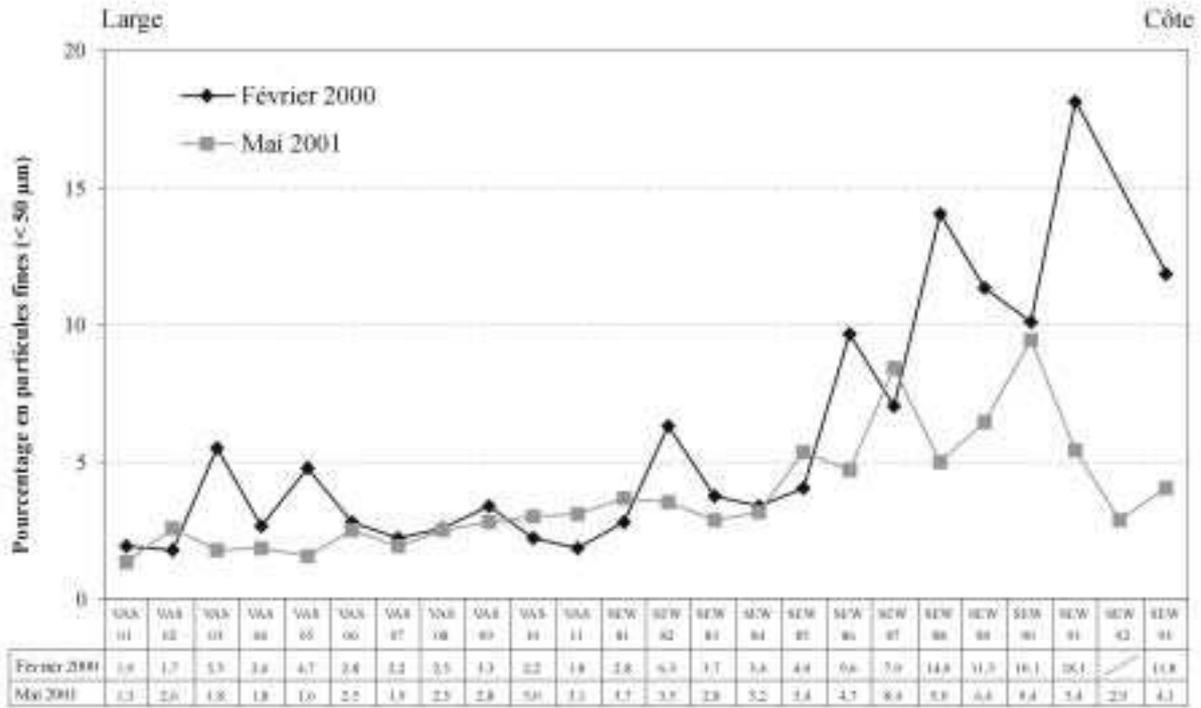


Figure III-35. Teneurs en fraction fine dans les sédiments superficiels en février 2000 et mai 2001 sur la radiale SEAWAIN située à l'est de Houlgate.

Par ailleurs, le prolongement de l'échantillonnage des radiales FLUXMANCHE vers le large (fig. III-34) permet de montrer que la tendance au désenvasement observé depuis mars 1999 sur les points situés en domaine subtidal ne se fait pas en faveur d'un déplacement des dépôts vaseux vers le large. En effet, la tendance est à la réduction du taux de fraction fine contenue dans les sédiments superficiels sur l'ensemble de la radiale considérée (fig. III-36).

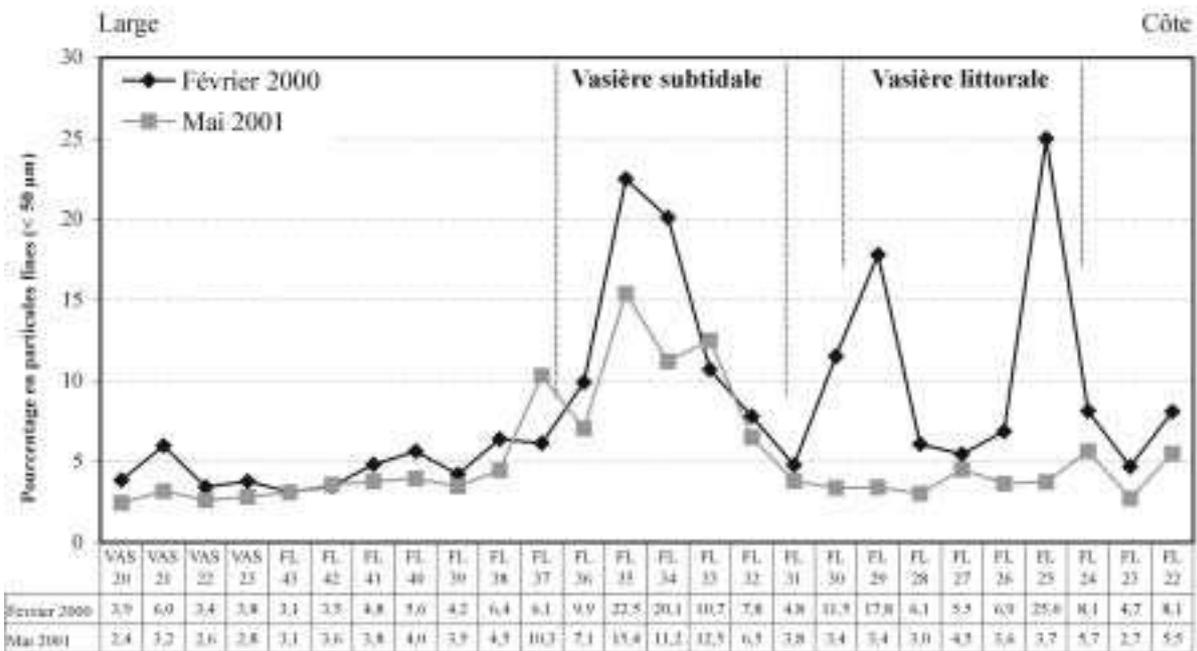
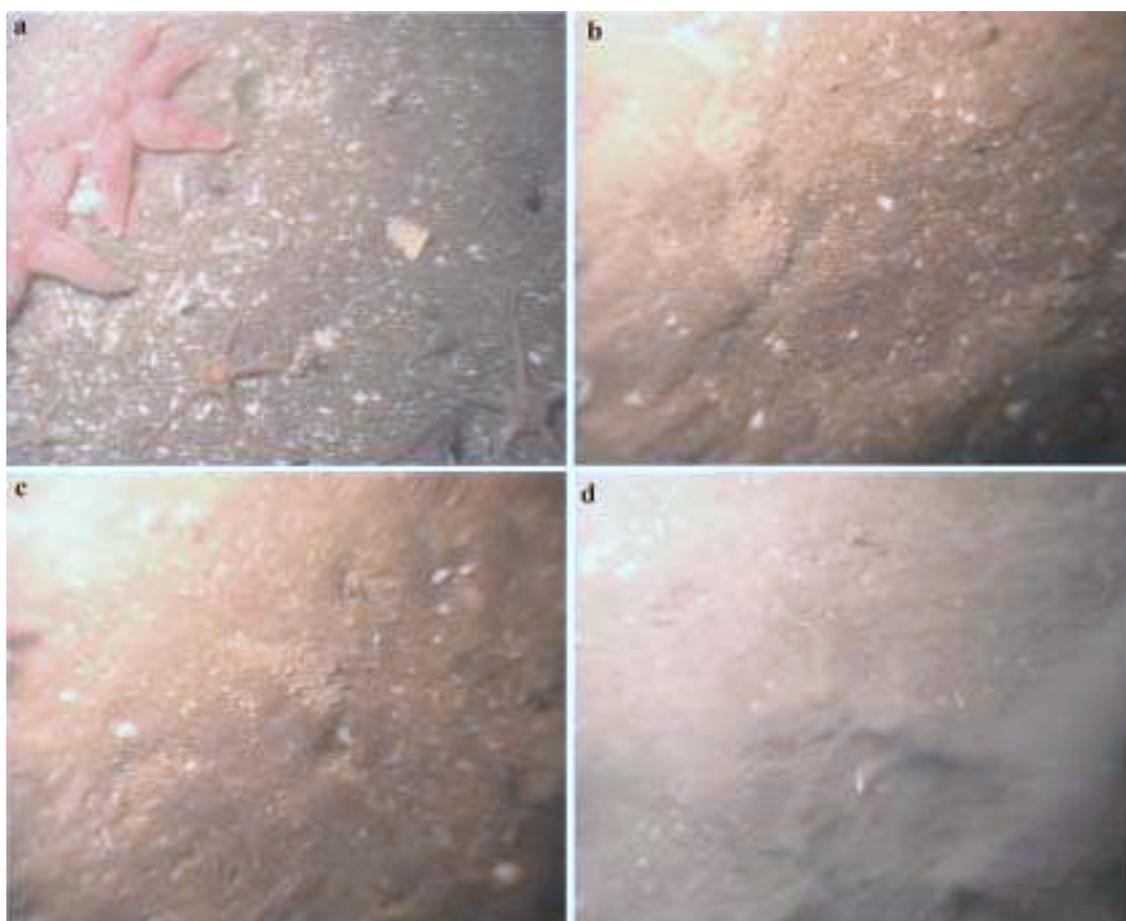


Figure III-36. Teneurs en fraction fine dans les sédiments superficiels sur la radiale FLUXMANCHE prolongée vers le large entre février 2000 et mai 2001.

#### 4.2.4 Informations apportées par l'imagerie sous-marine

##### 4.2.4.1 Vidéo sous-marine

Bien que les eaux de fond soient toujours extrêmement turbides sur la zone d'étude, des essais d'imagerie sous-marine ont été réalisés à plusieurs reprises à l'aide d'une caméra couleur submersible Osprey reliée à une centrale d'acquisition Cyclops OE1211. Les quelques clichés présentés ici sont issus des enregistrements effectués au mois de mai 1999 et ont été acquis sur des points situés à mi-distance sur la radiale FL01-FL21. A proximité des côtes du Calvados, par -6 m de profondeur d'eau, les fonds présentent généralement un faciès sableux à nombreux débris coquilliers. Ils sont souvent associés à une importante faune benthique de type étoile de mer, *Ophiothrix fragilis* (ophiures), *Pectinaria koreni* et *Albra alba* (fig. III-37a). Ces essais ont surtout permis de montrer de très légers dépôts de crème vase aux creux de rides ou en épandage sur le sable (fig. III-37b,c). Les dépôts fins sont très mobiles et la caméra vidéo-sous marine tractée au-dessus du fond les remet facilement en suspension (fig. III-37d). La mobilité de ces dépôts vaseux a été enregistrée au cours du cycle de marée avec le turbidimètre de la CTD installée en point fixe en mai 1999 (cf. § 7.3).



**Figure III-37.** Images sous-marines enregistrées sur l'une des radiales suivies en mai 1999. **a/** faune benthique (étoiles de mer et ophiures); **b, c/** dépôt de crème de vase au creux des rides; **d/** crème de vase remise en suspension.

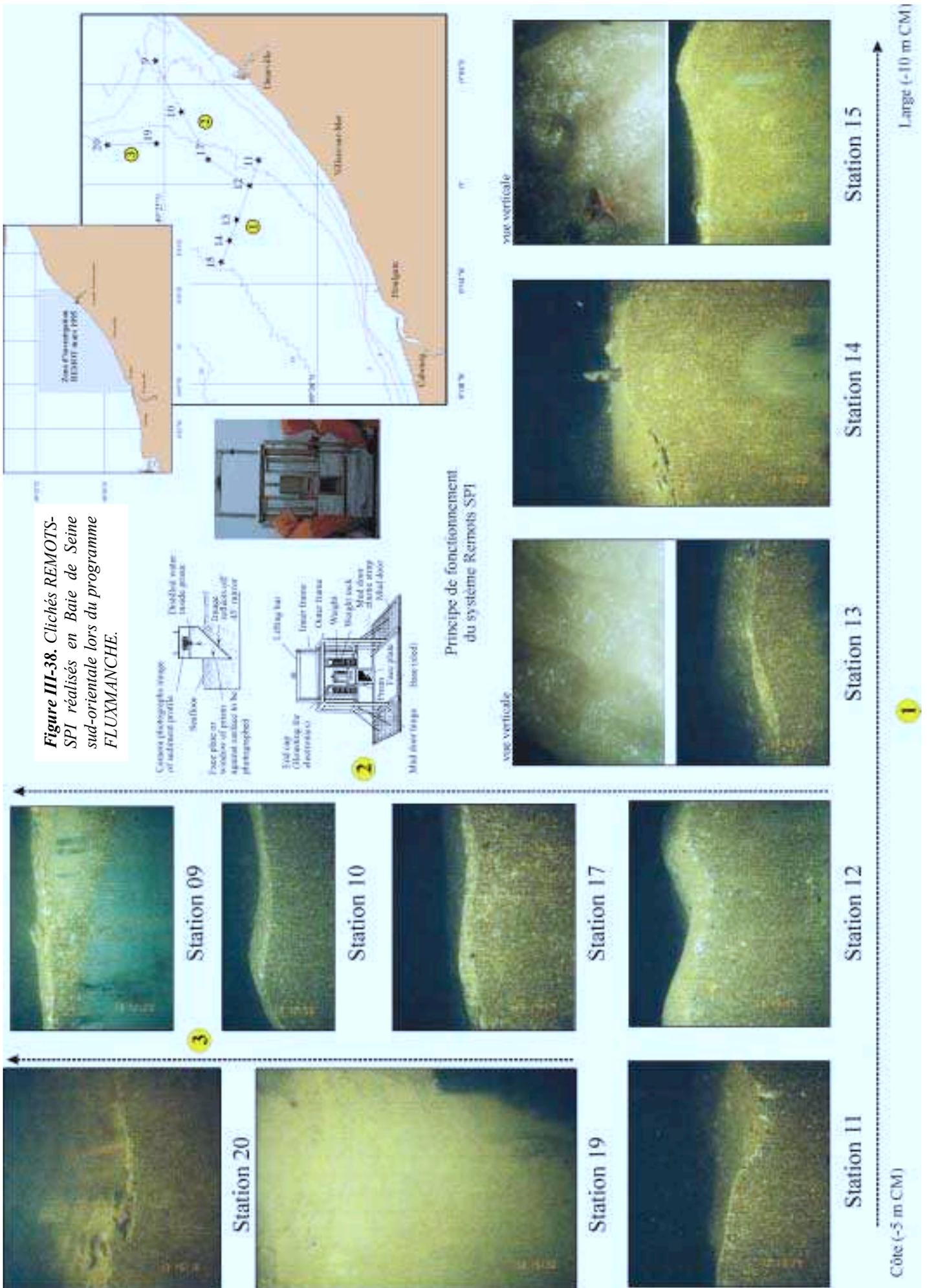
#### 4.2.4.2 Système photographique REMOTS-SPI

Lors de la campagne FLUXMANCHE réalisée en mars 1995, en pleine période de crue importante de la Seine (débit  $> 2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), une série d'images sous-marines a été obtenue à partir du système Remots-Sediment Profile Imaging (Rhoads & Germano, 1982; O'Connor *et al.*, 1989; Germano, 2002). Outre la possibilité d'obtenir une photo classique des fonds, ce système permet de prendre des clichés *in situ* de l'interface eau-sédiment sur 10 à 20 cm de profondeur. Les points sélectionnés se répartissent depuis Cabourg jusqu'à l'embouchure de la Seine (Aqua-Fact International Service Ltd., 1995; Lecouturier *et al.*, 1997). La figure III-38 présente quelques clichés Remots réalisés sur notre zone d'étude, sur 3 profils sélectionnés.

Ces images permettent de montrer la succession des faciès sédimentaires dans ces fonds peu profonds. Sur l'ensemble des clichés on distingue 2 types de dépôts, d'une part une couverture sédimentaire uniforme peu envasée dans le domaine ouvert (profil ❶ et stations 10 et 17, *fig. III-38*) et d'autre part des dépôts de vase molle fraîche dans la partie nord-est adjacente à l'embouchure de la Seine (profil ❸ et station 9, *fig. III-38*). Les photos réalisées sur les sites les plus proches de l'embouchure et sur le pourtour du banc du Ratier montrent des envasements superficiels importants, de plusieurs centimètres d'épaisseur parfois (stations 9, 19 et 20, *fig. III-38*): la station 19 illustre typiquement la ceinture de vase non consolidée du banc du Ratier (*fig. III-26 suite, p. 120*) avec en surface 10 à 15 cm de vase non consolidée, oxydée qui repose sur une vase compacte sombre. Dès que l'on s'éloigne de l'embouchure en direction de la Baie de Seine sud-orientale (profil ❷, *fig. III-38*), les sédiments sont modelés par de petites rides (4-5 cm de hauteur, longueur d'onde  $\sim 30$  cm) et ne présentent plus de dépôt de vase en recouvrement des sables. Le profil ❶, qui reprend 5 points de la radiale atelier étudiée lors de nos dernières missions, montre un sédiment sableux dont la fraction granulométrique et coquillière s'accroît en direction du large (*fig. III-38*). Les fonds sont systématiquement modelés par de petites rides visibles uniquement grâce à la mise en œuvre de ce système: la résolution du sonar à balayage latéral ne permet pas de cartographier ces petites structures (*cf. annexe 1*).

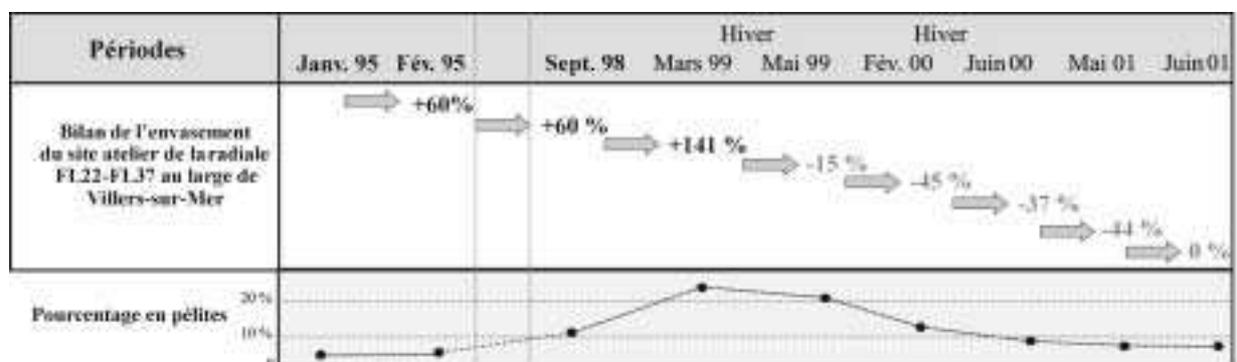
#### 4.2.5 Bilan des variations de l'envasement à l'échelle saisonnière

Les fluctuations saisonnières de la répartition des sédiments fins observées sur le secteur des deux radiales de la Baie de Seine sud-orientale sont très importantes et démontrent ainsi que ce secteur subtidal est très dynamique avec des fractions fines en continu mouvement.



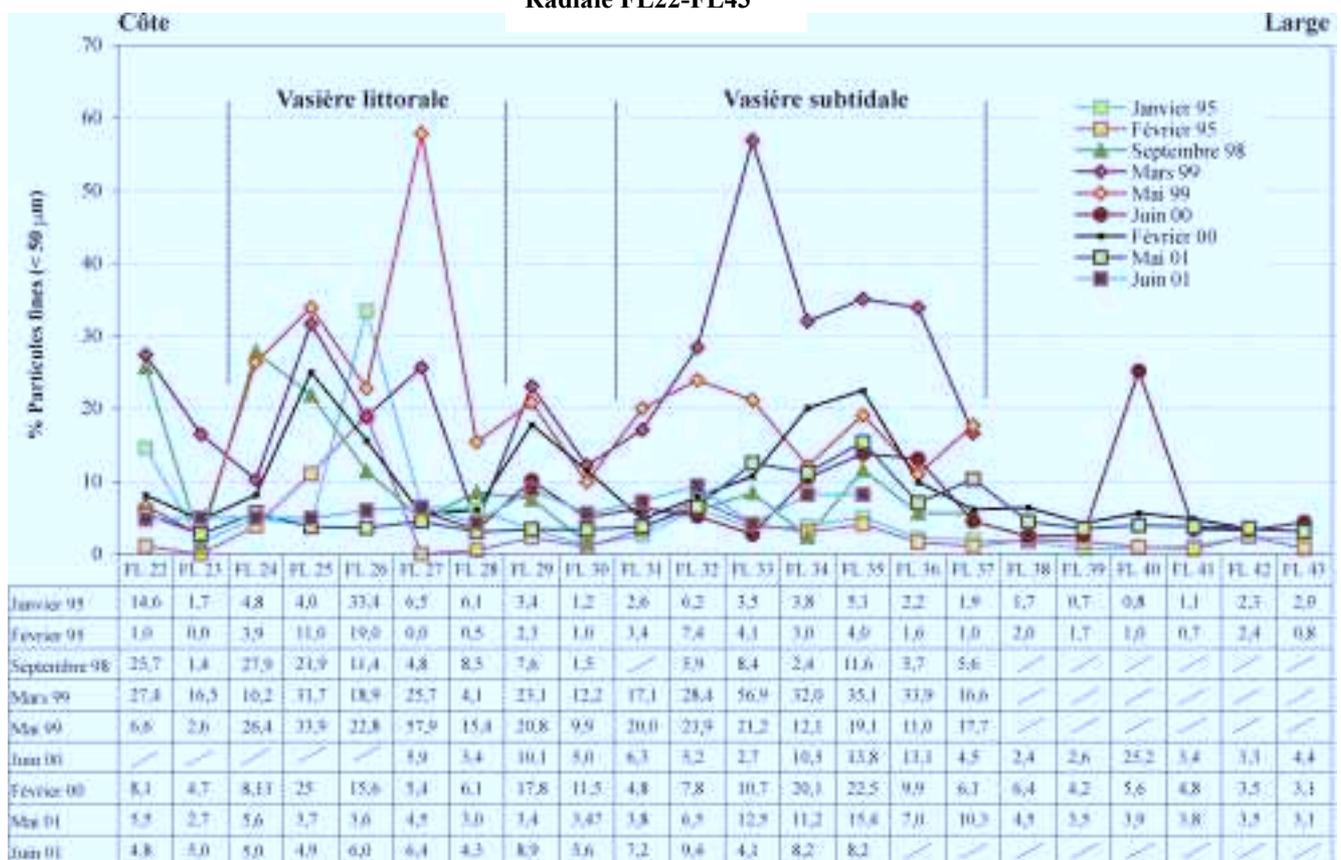
Ces fluctuations sont principalement causées par des arrivées rapides de sédiments fins qui se mettent en place sous forme de placages de vases fluides pouvant atteindre plusieurs centimètres venant recouvrir les sables fins et moyens de la couverture sédimentaire superficielle (fig. III-39, vasière subtidale et littorale). La répétition des échantillonnages sur les mêmes sites a permis de suivre l'évolution de ces dépôts fins durant les mois qui ont suivi leur mise en place. Les deux radiales montrent une grande variabilité spatiale des dépôts fins (fig. III-39). La vasière littorale, présente entre septembre 1998 et février 2000 à proximité des côtes du Calvados, montre une grande variabilité aussi bien du point de vue des données plus anciennes (janvier et février 1995) que des données récentes (mai et juin 2001) (fig. III-39). Cette évolution, importante le long de la radiale FL22-FL43, est au contraire, sur la radiale atelier voisine, très peu marquée aux mêmes périodes, ceci malgré un éloignement de moins de 1 km en direction de l'ouest des deux radiales d'échantillonnage. Le secteur de la vasière subtidale plus au large enregistre quant à lui les fluctuations sur les 2 radiales de manière synchrone. Les envasements temporaires de la Baie de Seine sud-orientale sont donc restreints à certaines zones bien délimitées géographiquement, de type "mud patches".

Le bilan moyen des fractions fines sur le secteur des radiales atelier montre que depuis septembre 1998, la Baie de Seine sud-orientale a connu un événement particulier en mars 1999 avec la mise en place d'une masse importante de sédiments fins sur une aire notable des petits fonds subtidaux. Depuis, dans l'ensemble et toutes profondeurs confondues, la tendance est à la diminution de l'envasement (fig. III-40). Il convient d'ajouter qu'une dernière série d'échantillonnages sur le secteur de la vasière subtidale en mars 2002 (13 points, mission SEAVINT) n'a pas montré d'envasement marqué sur les sites prélevés: les teneurs en fraction fine des sédiments sont très semblables à celles de la situation de mai et juin 2001. Ainsi, la situation de fin d'hiver de mars 1999 correspond au maximum d'envasement enregistré au cours de ces quatre dernières années (fig. III-40).



**Figure III-40.** Bilan de l'envasement de la zone atelier au large de Villers-sur-Mer depuis 1995 sur le site de la vasière subtidale (radiale de référence FL22-FL37). Les pourcentages en pélites figurés correspondent à une moyenne de 14 à 16 sites (Tableau III-3). Ce bilan ne prend pas en compte l'ensemble de la radiale car les points les plus au large n'ont pas été systématiquement échantillonnés (FL38-FL43).

Radiale FL22-FL43



Radiale FL21b-FL01

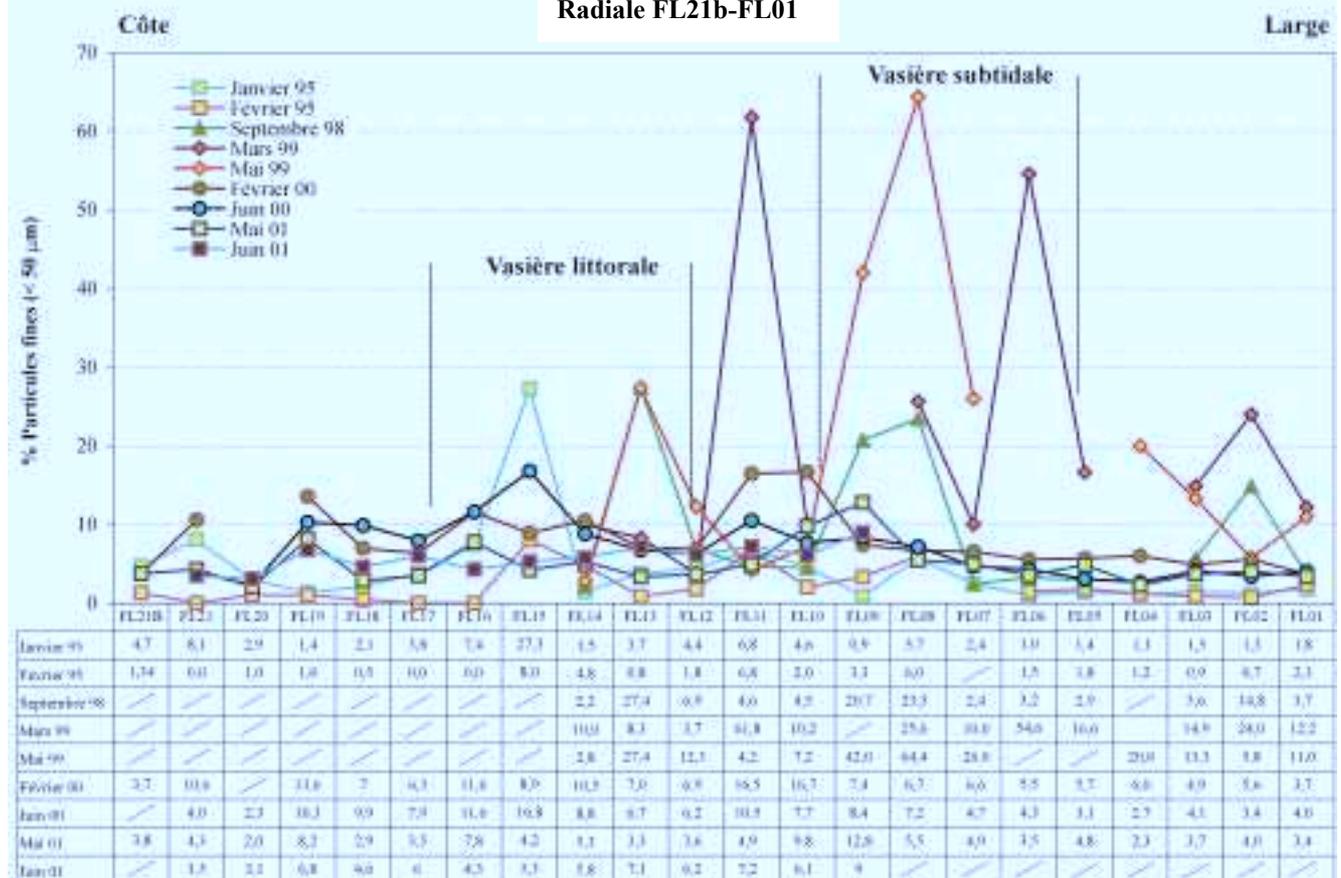


Figure III-39. Evolution spatio-temporelle le long des radiales ateliers depuis les missions FLUXMANCHE (janvier-février 1995), BENTHOSEINE 98 (septembre 1998), BENTHOSEINE 99 (mars et mai 1999) et VASTEDEBA

La tendance générale à l'échelle pluri-annuelle apparaît donc comme un léger envasement de ces fonds: la moyenne des fractions fines sur les sites de référence atteint 5 à 6% en mai-juin 2001 contre 3 à 4% en 1995. Après l'épisode d'envasement important de mars 1999, deux années auront été nécessaires pour un retour à la situation antérieure. Les facteurs qui contrôlent ces événements d'envasement seront présentés dans le paragraphe 7.

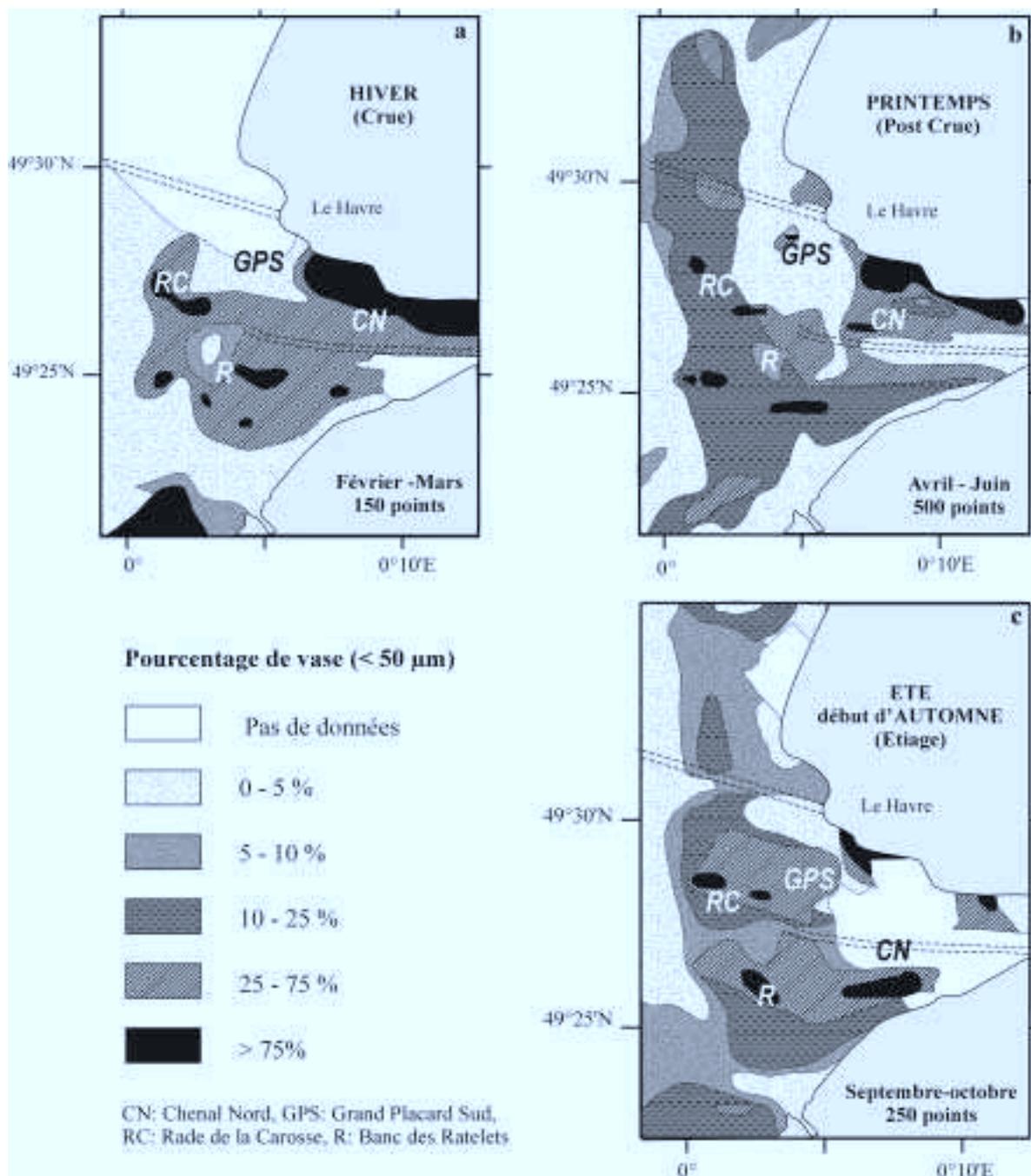
#### 4.3 Fluctuations de l'envasement en d'autres secteurs du système estuarien-Baie de Seine

##### 4.3.1 Répartition des sédiments fins dans l'embouchure de la Seine

Les récents travaux de Lesourd (2000) et Lesourd *et al.* (2003) sur l'embouchure de la Seine ont montré que la couverture sédimentaire évolue très rapidement en réponse à la mise en place de dépôts de crue épais et aux faciès homogènes (*fig. III-41*). De ce fait, les fluctuations sont à occurrences saisonnières avec un cycle de dépôt annuel contrôlé par des apports importants et rapides en période de crue hivernale. Cette phase de dépôt est suivie d'une redistribution progressive des sédiments fins dans l'estuaire en période de post-crue et d'été, sous l'action conjuguée des vagues (houles et clapot) et des courants de marée. Ainsi, seuls les dépôts situés dans les zones protégées de l'embouchure sont préservés tandis que les remises en suspension en zone ouverte alimentent le bouchon vaseux et les fonds marins adjacents. Pendant la période 1993-96, dans l'embouchure, les zones envasées ont été nettement moins étendues en étiage: 20% de pélites en moyenne en période estivale contre 40% en hiver (*fig. III-41*).

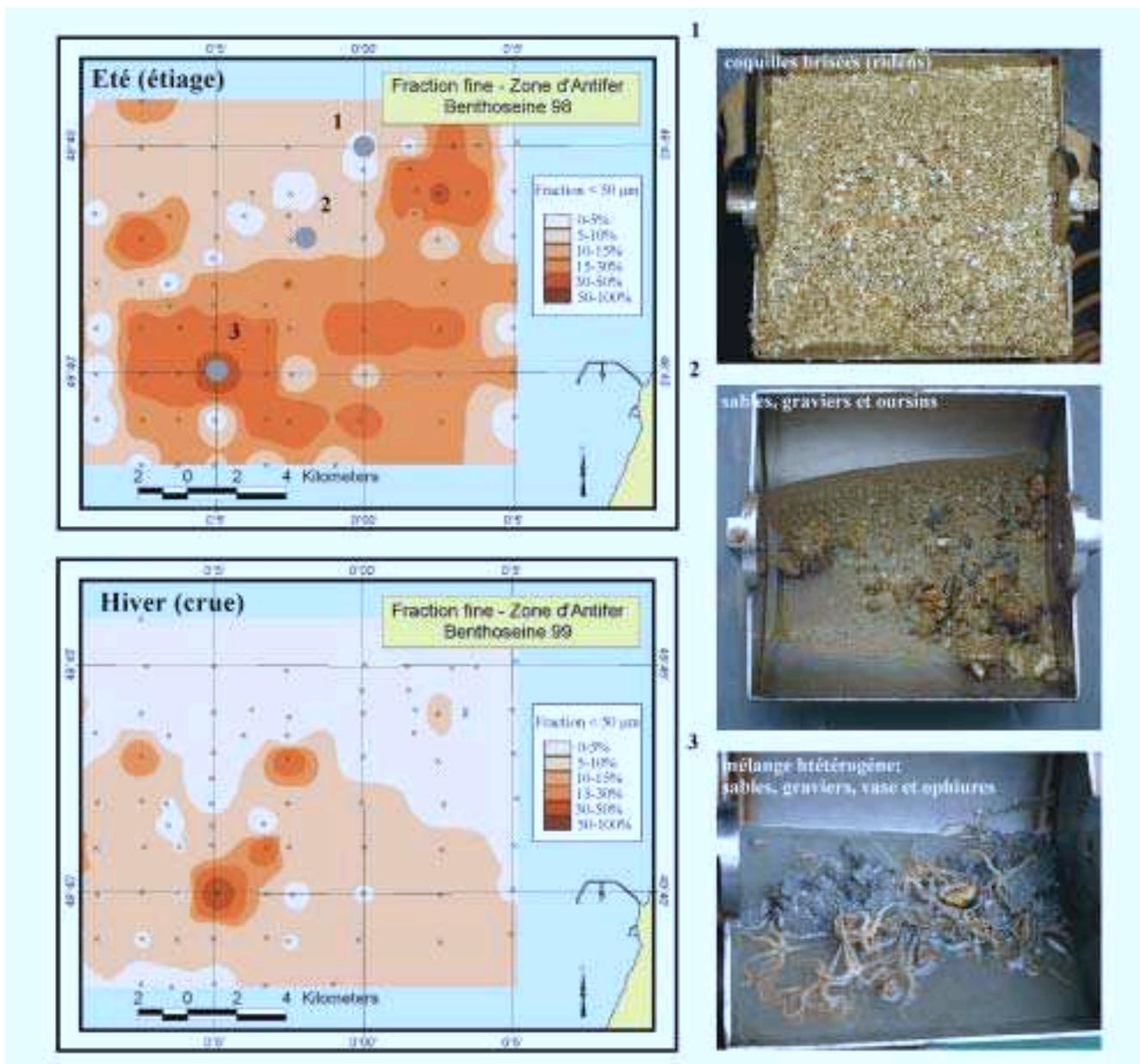
##### 4.3.2 L'envasement du secteur atelier de la Baie de Seine nord-orientale (fonds au large du cap d'Antifer)

Le secteur au large d'Antifer a également fait l'objet d'une étude de la nature des sédiments superficiels au pas de temps saisonnier (*fig. III-42*). Ces travaux ont été dirigés par l'équipe de sédimentologie d'INTECHMER (Cherbourg). Certaines reconnaissances ont été réalisées aux mêmes périodes que les nôtres (campagnes BENTHOSEINE et VASTEDEBA), avec un échantillonnage quasi-synchrone (à quelques jours d'intervalle) des secteurs nord et sud de la Baie de Seine orientale. Les cartes présentées reprennent des résultats obtenus par cette équipe entre septembre 1998 et mars 1999, ainsi que des photographies de quelques sédiments prélevés (*fig. III-42*).



**Figure III-41.** Cartes de synthèse de la répartition des fractions fines dans l'embouchure au cours de la période 1993-1996 (d'après Lesourd, 2000).

En septembre 1998, l'envasement des fonds au large du cap d'Antifer est notable (fig. III-42); il ne s'agit pas d'une vase unique, mais d'un ensemble de taches vaseuses (mud patches) de faibles dimensions, hectométriques à kilométriques. Les taches de vase s'étendent souvent dans les dépressions entre des bancs de sable. Toutefois, certains dépôts vaseux échappent à cette règle et s'étendent sur des replats topographiques. Une importante population d'ophiures (*Ophiothrix fragilis*) est également associée à des vases molles, à des profondeurs proches de 30 m (fig. III-42, photo n°3).



**Figure III-42.** Teneurs en fraction fine dans les sédiments superficiels prélevés au large du port d'Antifer en septembre 1998 (BENTHOSEINE 1998) et mars 1999 (BENTHOSEINE 1999). Les trois photographies des sédiments prélevés sur ce site montrent l'hétérogénéité du matériel rencontré et la variabilité spatiale des faciès sédimentaires (Lesueur *et al.*, 2002). Les numéros visibles sur la carte du haut se rapportent aux trois photographies.

L'échantillonnage de mai 1999 a permis de mettre en évidence la variabilité des envasements au cours de deux saisons successives: le secteur d'étude dans son ensemble (environ 150 sites d'échantillonnage) a subi une nette diminution du taux de fraction fine entre la situation d'étiage et celle de printemps. Le taux d'envasement moyen est deux fois plus faible, passant de 12 à 6%. Cette diminution n'est toutefois pas uniformément répartie; en effet, certaines taches de vase sont pérennes. A noter que la tendance à l'envasement des fonds face à Antifer en conditions de fin d'étiage confirme de précédentes observations entre 1993 et 1995 (Avoine, 1994; Avoine *et al.*, 1996) et peut être mise en relation avec une moindre agitation de la mer au cours de cette saison.

En résumé, cette tendance à la diminution de taux d'envasement de septembre 1998

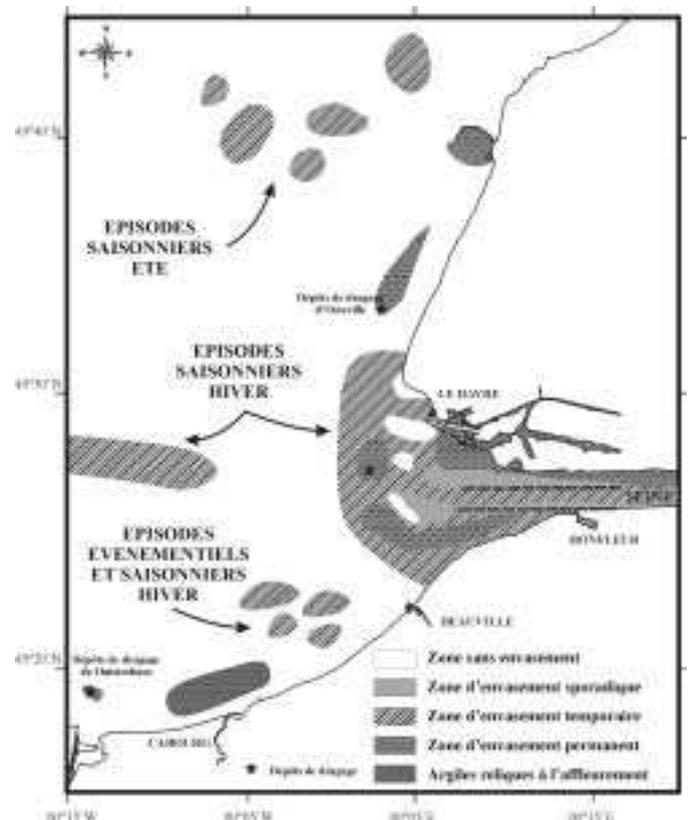
(étiage) à mars 1999(hiver) est contraire à la tendance précédemment décrite dans la partie sud de la Baie de Seine orientale.

#### 4.4 Synthèse: tendances saisonnières des envasements dans le système embouchure de la Seine - Baie de Seine orientale

Dans ce schéma de changement des envasements observés dans l'ensemble du système embouchure-Baie de Seine, il faut distinguer les épisodes saisonniers, par définition récurrents, des épisodes de type événementiel (*fig. III-43*). Les variations observées dans l'embouchure de la Seine sont dominées par des envasements saisonniers comme le montrent les travaux de Lesourd (2000) et Lesourd *et al.* (2003). L'action conjuguée des houles et des courants de marée dans les fonds peu profonds de l'embouchure de la Seine remobilise en période de post-crue les sédiments déposés.

Les études menées au large d'Antifer montrent également un caractère saisonnier de la répartition des sédiments fins (*fig. III-43*). Toutefois, alors que l'envasement est maximum dans l'embouchure de la Seine en période hivernale, les fonds subtidaux de la Baie de Seine nord-orientale sont plus envasés en été. L'interprétation possible est l'agitation importante de la mer en période hivernale en ce secteur ouvert à l'ouest, qui le rend peu favorable aux dépôts de sédiments fins ceci malgré les eaux fortement chargées en MES en périodes de crues (Thiébaud, 1996) transitant le long de cette partie du littoral de la Manche orientale au sein du "fleuve côtier Seine" (Brylinski *et al.*, 1991; Dupont *et al.*, 1991). Les conditions d'agitation étant statistiquement affaiblies à la fin du printemps et en été, le secteur d'Antifer devient alors un site propice aux dépôts et au piégeage des sédiments fins au sein d'un sédiment sablo-graveleux colonisé par une forte densité d'ophiures. Outre les apports directs de MES de la Seine transportés par les courants de marée à résiduelle nord, le lessivage du dépôt de dragage du port du Havre à Octeville (*fig. III-43*) contribue aussi à cet envasement.

Dans la Baie de Seine sud-orientale, le suivi saisonnier des dépôts entrepris depuis 1998 montre que les envasements se produisent surtout lors d'épisodes à caractère événementiel (*fig. III-43*). En effet, seule la mission de mars



**Figure III-43.** Modalités des fluctuations saisonnières de la couverture sédimentaire en Baie de Seine orientale. Données des zones d'envasement de l'embouchure de la Seine: Lesourd (2000) et Lesourd *et al.* (2003) modifiées pour la ceinture du banc du Ratier à partir des données présentées dans ce chapitre.

1999 a permis de mettre en évidence un apport significatif et individualisé de sédiments fins sur de larges surfaces. Ainsi, dans l'ensemble du système, les sédiments fins se déplacent d'après un schéma complexe depuis l'estuaire jusqu'au fonds subtidaux du nord et du sud de l'embouchure, avec des modalités particulières à chaque site, intégrant les conditions hydrodynamiques (courants de marée, houles), les conditions d'apport (crues), la morphologie des fonds et localement l'activité benthique (ophiures). Les modalités du transport des sédiments en Baie de Seine sud-orientale font l'objet de la suite du chapitre

### **5. Transport sédimentaire résiduel en Baie de Seine sud-orientale : méthode de Gao et Collins et confrontation avec les données *in situ*.**

Si la méthode de Gao et Collins (1991; 1992) a fait l'objet de certaines controverses dans ses premiers développements (Le Roux, 1994a, b), ses applications en domaine marin sont maintenant courantes dans les problématiques de recherche scientifique (Mallet *et al.*, 2000a; Vanwesenbeeck & Lanckneus, 2000; Carrigny *et al.*, 2001; Le Bot *et al.*, 2001). En effet, la plupart des études basées sur cette méthode ont permis de prédire les sens de transport résiduel en domaine marin avec une assez bonne crédibilité vis-à-vis d'autres moyens d'investigations directs plus coûteux (e.g. traceurs, sonar à balayage latéral, vidéo sous-marine). L'originalité de cette méthode réside dans l'utilisation simultanée de trois paramètres statistiques usuels (moyenne:  $\mu$ , classement:  $\sigma$ , asymétrie:  $Sk$ ) dans la procédure de traitement des données granulométriques des sédiments superficiels. L'objectif est de mettre en évidence les filiations entre les sédiments prélevés, pour les exprimer ensuite sous la forme de directions de transport sédimentaire.

Les fondements, le principe et la construction des vecteurs de transport résiduel de la méthode de Gao et Collins font l'objet d'un développement en annexe 3.

#### 5.1 Domaines d'application et fraction sédimentaire concernée

Les champs d'application de cette méthode sont assez larges; elle a été testée sur des environnements hydrosédimentaires très divers:

- estuaires (Mc Laren & Bowles, 1985; Wu & Shan, 1999; Mallet *et al.*, 2000b),
- baies (Gao & Collins, 1995; Ehrhold, 1999; Wu & Shan, 1999),
- barres sableuses intertidales (Pedreros *et al.*, 1996; Stepanian, 1997),
- bancs sableux tidaux (Gao *et al.*, 1994; Mallet *et al.*, 2000a; Vanwesenbeeck & Lanckneus, 2000),
- dunes sous-marines (Le Bot, 2001; Le Bot *et al.*, 2001),
- ou encore pour l'étude de la dynamique des sédiments fins (Gao & Collins, 1992; Carrigny & Sanchez, 1999; Carrigny *et al.*, 2001).

Les fondements de la méthode de Gao et Collins reposent sur le déplacement des sédiments sur le fond par traction et saltation. Mais en fait, ces transports peuvent concerner jusqu'à 20% de fraction fine en Baie de Seine centrale si on considère qu'une partie de ces sédiments est piégée dans les interstices entre les grains grossiers ou déplacée par fixation sur des graviers ou sables moyens (Spineanu, 1998). Carrigny et Sánchez (1999) et Carrigny *et al.* (2001) ont montré que la méthode de Gao et Collins pouvait être utilisée dans des fonds marins au large du delta de la Colorado River et du Golfe de Californie constitués à 90% de sédiments fins, de moyenne granulométrique  $< 63 \mu\text{m}$ . On s'aperçoit toutefois de la limite de cette méthode dans un tel environnement, puisque ces auteurs déterminent des sens de transport sur des échanges sédimentaires qui s'effectuent principalement en suspension à l'intérieur du golfe.

Dans la plupart des milieux étudiés, c'est le cas combiné CB+/FB-<sup>5</sup> (*cf. annexe 3*) qui fournit, par rapport aux sens de transports connus (figures observées et modélisation), les meilleurs résultats en terme de direction déduite des transports sédimentaires dans les estuaires (Mallet *et al.*, 2000b), sur les dunes sous-marines (Le Bot, 2001; Le Bot *et al.*, 2001), ou sur les bancs sableux (Lanckness *et al.*, 1992; Gao & Collins, 1994). Dans un environnement sédimentaire aussi hétérogène que les fonds de la Baie du Mont-Saint-Michel, Ehrhold et Auffret (1996) et Ehrhold (1999) ont montré que la meilleure cohérence entre les vecteurs calculés par la méthode de Gao et Collins et les sens de transport observés par des figures sédimentaires est établi lorsque seules les fractions sédimentaires mobiles sablo-argileuses étaient considérées: corrélation à 60% pour les cas FB-, CB+ et CB+/FB-. Une conclusion analogue a également été proposée dans l'étude de dunes sous-marines du détroit du Pas-de-Calais où la méthode offre aussi les meilleurs résultats lorsqu'elle est appliquée aux fractions sédimentaires qui participent réellement au transport; il s'agit de débris coquilliers (0,8-4 mm) et de quartz de taille inférieure à 0,8 mm (Le Bot, 2001; Le Bot *et al.*, 2001).

Lorsque les sédiments échantillonnés dans les fonds concernent à la fois des graviers et cailloutis ne participant pas directement au transport sédimentaire actuel, il est préconisé de procéder à des ségrégations de classes granulométriques avant d'utiliser la méthode de Gao et Collins (Baie du Mont-Saint-Michel et dunes sous-marines du détroit du Pas-de-Calais). Aux faibles profondeurs de la zone d'investigation dans la Baie de Seine, la couverture sédimentaire associant des sédiments sableux, sablo-vaseux ou vaseux, est très mobile sous l'action des courants de marée et de l'agitation liée aux vagues. Dans cette étude, aucune séparation de classes granulométriques n'a donc été faite pour la méthode de Gao et Collins.

---

<sup>5</sup> CB+: Coarser Better sorted, more positively skewed; FB-: Finer, Better sorted, more negatively skewed

## 5.2 Transports sédimentaires résiduels saisonniers en Baie de Seine sud-orientale selon la méthode de Gao et Collins

A notre connaissance, aucune étude n'a porté sur une application de la méthode dans un contexte sédimentaire permettant de discuter des directions et sens de transport obtenus à l'échelle saisonnière. Le domaine sud-oriental de la Baie de Seine est un bon candidat pour tester la méthode à cette courte échelle de temps, compte tenu de la variabilité saisonnière des dépôts mis en place. Toutefois, l'utilisation de cette méthode sur des sédiments essentiellement sableux mais qui peuvent contenir des teneurs en fraction fine importante, implique de considérer un déplacement de ce "mélange" au voisinage du fond par traction et saltation. Il nous est alors apparu intéressant de renouveler l'échantillonnage complet de la zone côtière de la Baie de Seine sud-orientale en juin 2001 en reprenant ainsi la majorité des points effectués préalablement en février 2000. Ainsi, les éventuelles différences observées dans les directions de transports entre les deux conditions d'échantillonnage pourront être directement attribuées à des fluctuations saisonnières du contexte hydrodynamique de la Baie de Seine.

Dans notre étude, le calcul des vecteurs tendances (*cf.* annexe 3) a été réalisé à l'aide du logiciel DERSEDI version 2 (DERive SEDimentaire) développé par le SHOM sur station de travail et PC/windows, puis complété par Pedreros (Pedreros *et al.*, 1996) pour l'EPSHOM. Depuis quelques années, il existe de nouvelles versions présentées sous deux formats: Fortran<sup>6</sup> (Gao, 1996; Chang *et al.*, 2001) et Excel-VBA<sup>7</sup> (Le Roux *et al.*, 2002). Ces nouveaux programmes présentent des améliorations notables de la méthode originelle avec par exemple l'utilisation de tests de signification de la longueur des vecteurs calculés (Chang *et al.*, 2001) ou encore des filtres d'intensité de transport (Le Roux *et al.*, 2002). Les valeurs et la répartition des paramètres granulométriques pris en compte ont été présentés en début de chapitre (*fig. III-6, p. 93 et III-8, p. 95*) et leurs modes de calcul sont indiqués en annexe 2. Les trois cas retenus dans cette étude pour le calcul des transports résiduels sont ceux classiquement utilisés: CB+, FB- et CB+/FB-, avec prise en compte de la composition totale du sédiment. La distance de calcul (Dcl) choisie est de 3000 m pour toutes les cartes de vecteurs de transport proposées, suite aux résultats obtenus par le variogramme (Garnaud *et al.*, 2001; Poizot *et al.*, soumis).

### 5.2.1 Directions et sens de transport calculés par la méthode en période hivernale (février 2000)

Les échantillons utilisés sont les mêmes que ceux exploités pour l'étude de la répartition des sédiments fins dans le domaine oriental de la Baie de Seine (*cf. annexe 1*).

---

<sup>6</sup> <ftp://ftp.iamg.org/VOL27/v27-1-12.zip>

<sup>7</sup> <ftp://ftp.iamg.org/VOL28/v28-05-13.zip>

Le maillage régulier de l'échantillonnage entre la côte et -15 m CM ne nécessite pas la mise en place d'une grille d'interpolation.

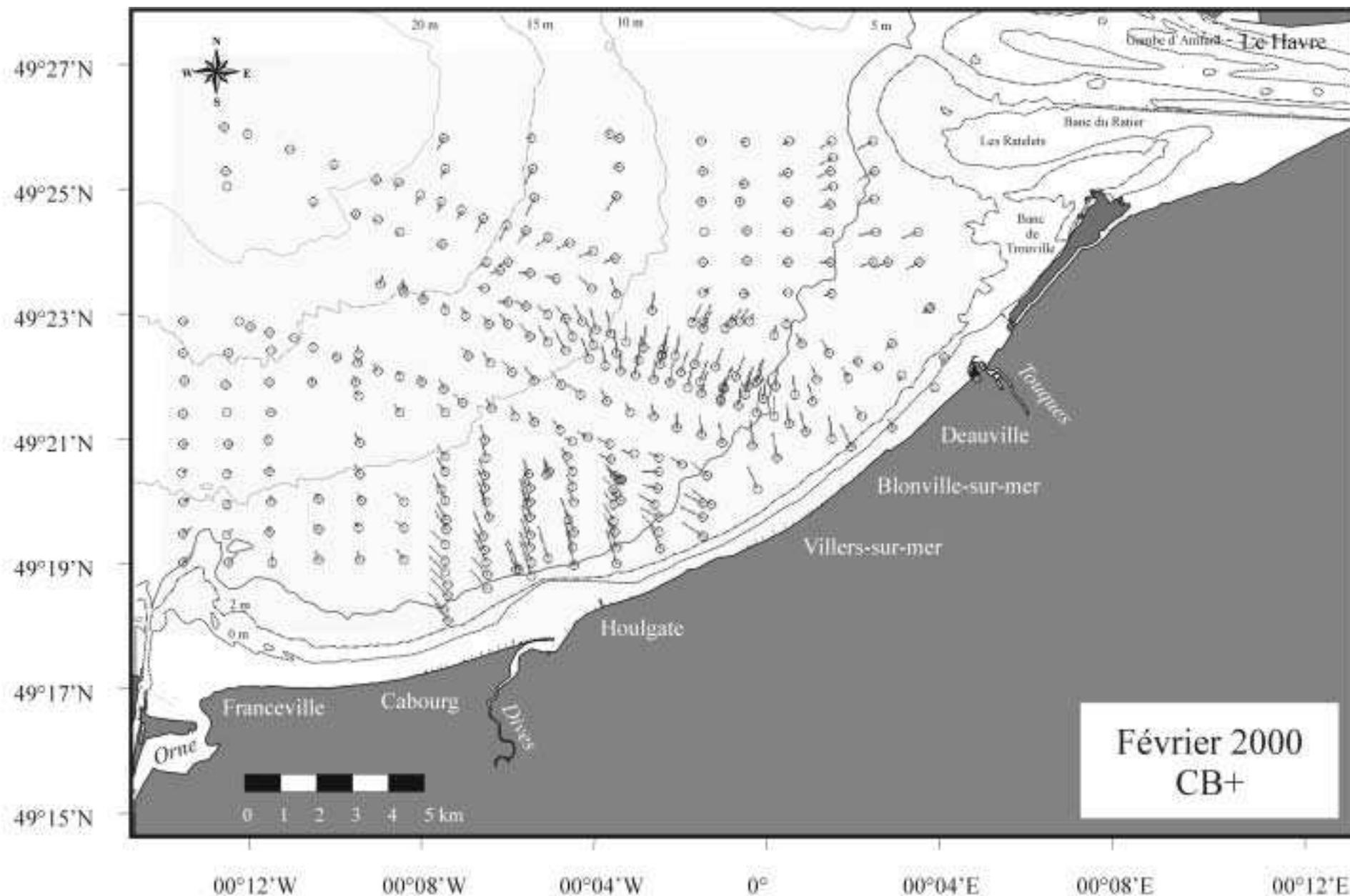
Dans le cas CB+ (Coarser, Better sorted and more positively skewness), les vecteurs de transit indiquent un transport orienté dans plusieurs sens qui convergent vers deux principaux secteurs: le premier situé à l'ouest du banc du Ratier entre -5 et -10 m et le second vers le large en direction du Parfond, à une profondeur de -15 à -20 m (*fig. III-44*). En utilisant le cas combiné CB+/FB-, on observe les mêmes tendances (*fig. III-45*). En fait, les vecteurs obtenus dans les cas CB+ et CB+/FB- convergent vers des zones où les fonds sont constitués de matériel sableux grossier de moyenne granulométrie supérieure à 0,6 mm (*fig. III-6, p. 93*). Le fait marquant est l'apparition d'une dynamique orientée depuis la côte vers le large, entre Cabourg et jusqu'à Blonville-sur-Mer, dans les deux cas considérés. Cette dynamique est interprétée comme la conséquence des fortes tempêtes qui, d'une manière générale, redistribuent les sédiments sableux depuis le haut de plage vers le bas estran et les fonds marins subtidaux (e.g. Héquette & Hill, 1993; Russel, 1993; Ruessink *et al.*, 1998). Ces conditions d'agitation étant maximales en hiver (*cf. chapitre I*), ce sens de transport résiduel apparaît donc naturellement à cette période sur nos cartes.

Le transport obtenu par le cas FB- montre des résultats différents des cas précédents avec des vecteurs convergents, mais cette fois en direction du littoral vers un dépointe situé entre -8 m CM et la côte entre Villers-sur-Mer et l'Ouest de Deauville (*fig. III-46*). Les différents sens des vecteurs qui convergent vers ce secteur sont liés à des mécanismes hydrodynamiques distincts:

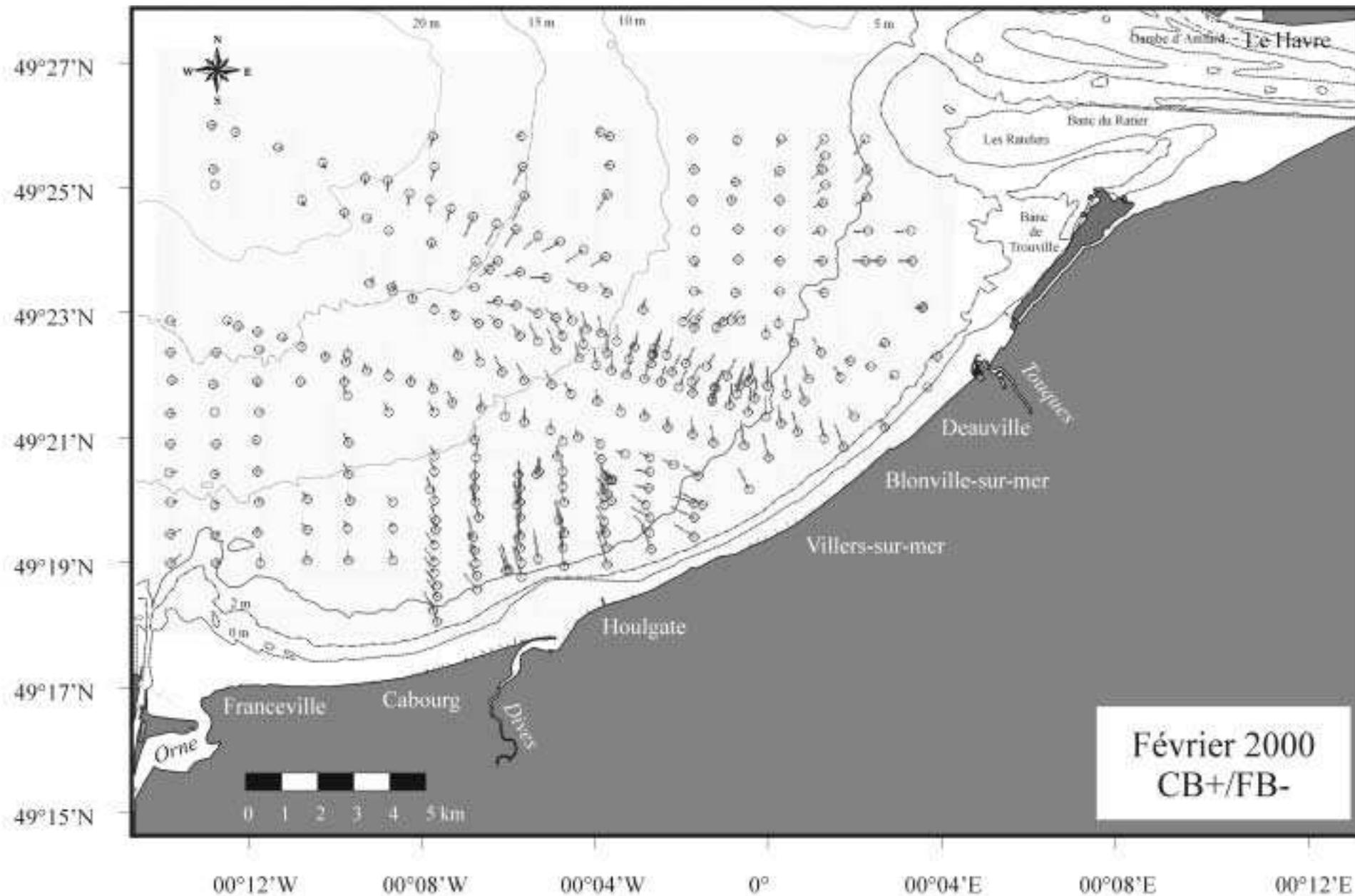
- entre Ouistreham et Villers-sur-Mer, les vecteurs sont orientés vers l'est et peuvent être mis en relation avec (1) les courants de flot dominants, en particulier un courant parallèle à la côte appelé courant du Calvados (*fig. I-13, p. 35*) et (2) une dérive littorale W-E sous l'action des vagues (e.g. formation d'une flèche sableuse à Cabourg, *fig. I-12, p.33*),
- les vecteurs "entrants", dirigés depuis le Parfond (> -20 m CM) vers le littoral, sont associés aux courants de flot dominants NW-SE par ces profondeurs,
- et un sens de transit N-S dans un secteur entre une partie nord rattachée à l'embouchure de la Seine (Ratier) et une autre partie au large de Villers-sur-Mer. Ce sens peut être expliqué par le charriage de sables en provenance des sédiments remobilisés par les houles à l'extrémité ouest du Banc du Ratier (Les Ratelets), et transportés ensuite par les courants de marée vers le S et SW. Ces fonds correspondent au secteur de faible envasement décrit auparavant (*cf. § 3.2.3.3*) où des vitesses orbitales sur le fond plus importantes (0,2-0,3 m.s<sup>-1</sup>) sont mises en évidence (Le Hir & Silva Jacinto, 2001).

Il est difficile d'utiliser sur l'ensemble de ces cartes la notion d'intensité de transport en fonction de la longueur des vecteurs dessinés. En effet, les points de prélèvements les plus au large ( $> -15$  m) sont plus éparpillés et ne permettent pas de comparaison avec la longueur des vecteurs obtenus à la côte.

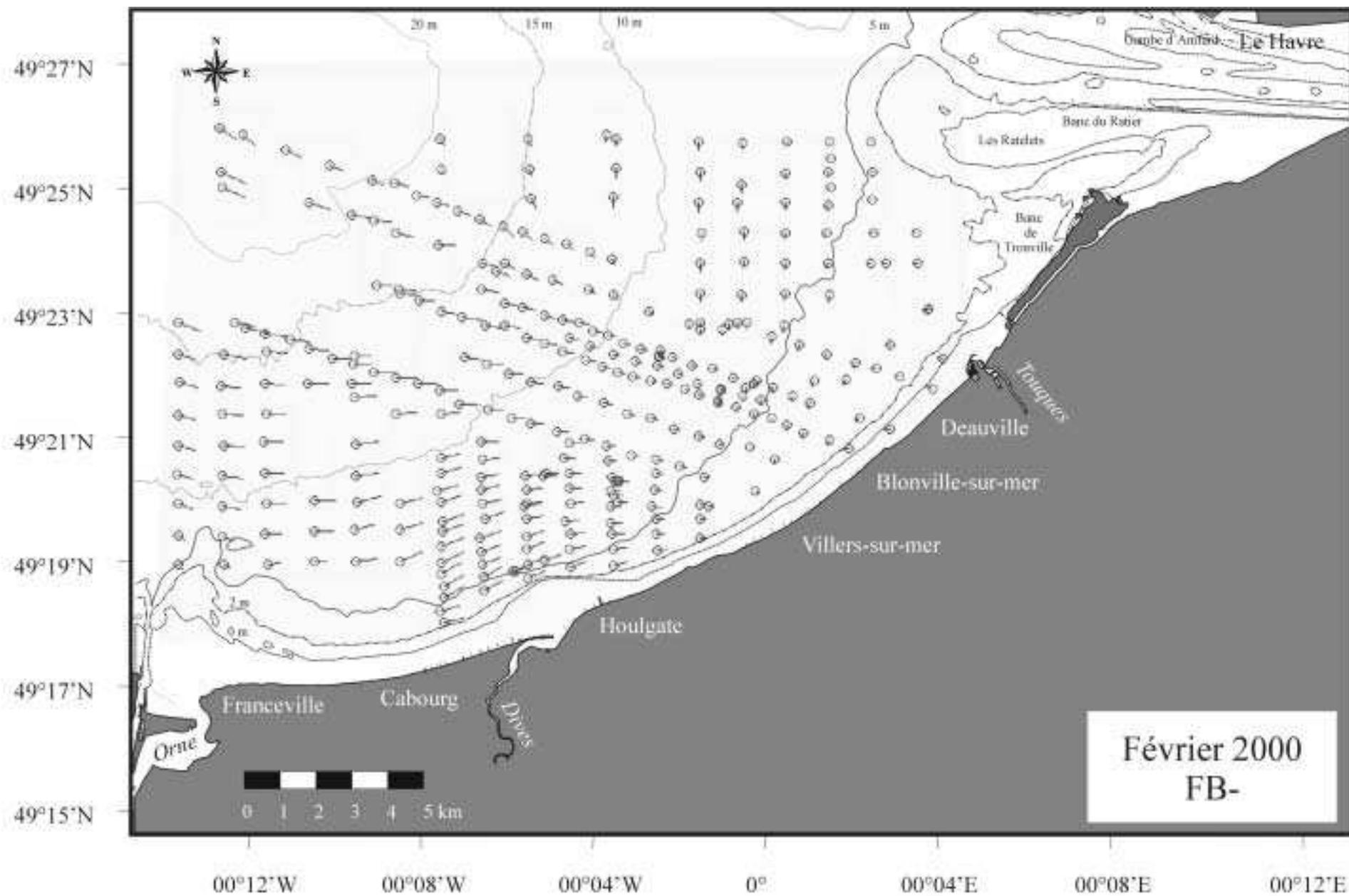
Pour les trois cas étudiés CB+, CB+/FB- et FB- (*figs. III-44, III-45 et III-46*), les vecteurs de transport résiduel se rejoignent vers des zones de convergence, appelée points nodaux de convergence par Ehrhold (1999), et qui diffèrent selon les cas choisis. En fait, les trois cas semblent reproduire le sens d'un transport résiduel sur le fond de deux classes granulométriques distinctes que sont d'une part les sables fins à moyens (CB+ et CB+/FB-) et d'autre part les sables fins vaseux (FB-). Une observation analogue a été faite par Le Bot (2001) dans le travail réalisé sur les dunes sous-marines du détroit du Pas-de-Calais. Dans l'étude citée, le cas CB+ correspond à une dynamique de forts contrastes énergétiques mettant en évidence les directions de migration à long terme des dunes. Le cas FB- est quant à lui sensible aux déplacements actifs des sédiments les plus fins ( $< 4$  mm), mobilisés à chaque phase de marée. Dans d'autres sites comme les baies de Yangpu et Xinying (sud de la Chine), Gao et Collins (1992) soulignent également la présence de sites de convergence des vecteurs de transport dans les zones d'accumulation de sédiments fins (vases et sablons). Les auteurs interprètent ces convergences comme indicatrices de site de sédimentation préférentielle.



**Figure III-44.** Vecteurs de transport résiduel calculés par la méthode de Gao et Collins pour les cas CB+ en Baie de Seine sud-orientale en février 2000. ○ point d'échantillonnage, le segment indique le sens du transport.



**Figure III-45.** Vecteurs de transport résiduel calculés par la méthode de Gao et Collins pour les cas CB+/FB- en Baie de Seine sud-orientale en février 2000. ○ point d'échantillonnage, — le segment indique le sens du transport.



**Figure III-46.** Vecteurs de transport résiduel calculés par la méthode de Gao et Collins pour les cas FB- en Baie de Seine sud-orientale en février 2000.  $\circ$  point d'échantillonnage, le segment indique le sens du transport.

### 5.2.2 Directions et sens de transport calculés par la méthode en période estivale (juin 2001)

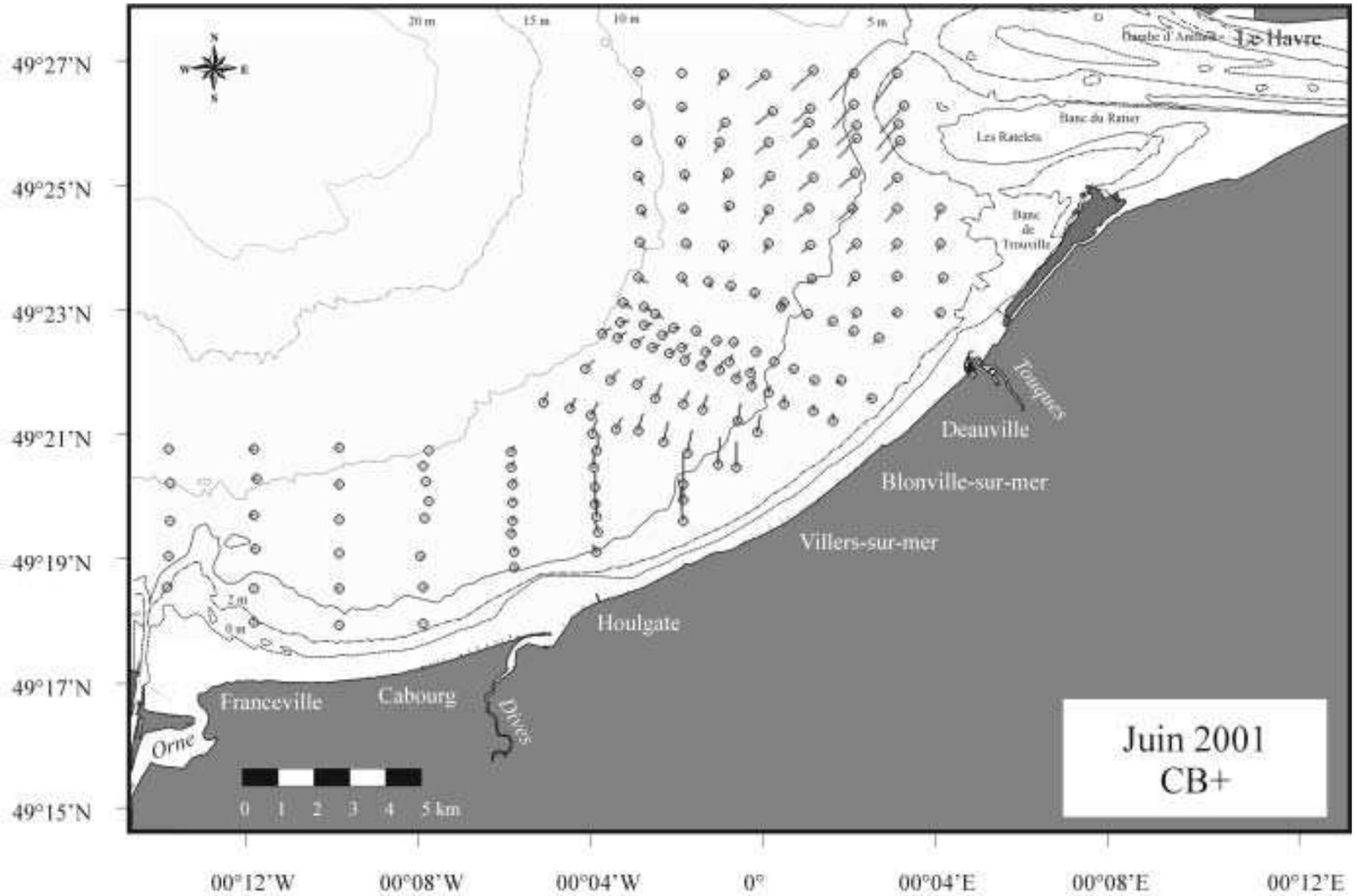
Les vecteurs calculés prennent en compte les points de prélèvements situés sur la frange littorale de notre secteur d'étude (profondeur < 10 m). Le calcul des sens de transport résiduel est réalisé sur les cas similaires à ceux choisis pour février 2000: CB+, FB- et CB+/FB-.

Ainsi, lorsque les cas CB+ et CB+/FB- sont utilisés, les vecteurs soulignent un transport parallèle d'ouest en est entre Ouistreham et Villers-sur-Mer et inversement orienté d'est vers l'ouest entre l'embouchure de la Seine et Deauville (*figs. III-47 et III-48*). Il en résulte un lieu de convergence des transports au NW de Deauville. Pour la situation de février 2000, nous avons attribué cette dynamique de transport à la fraction la plus grossière des sédiments.

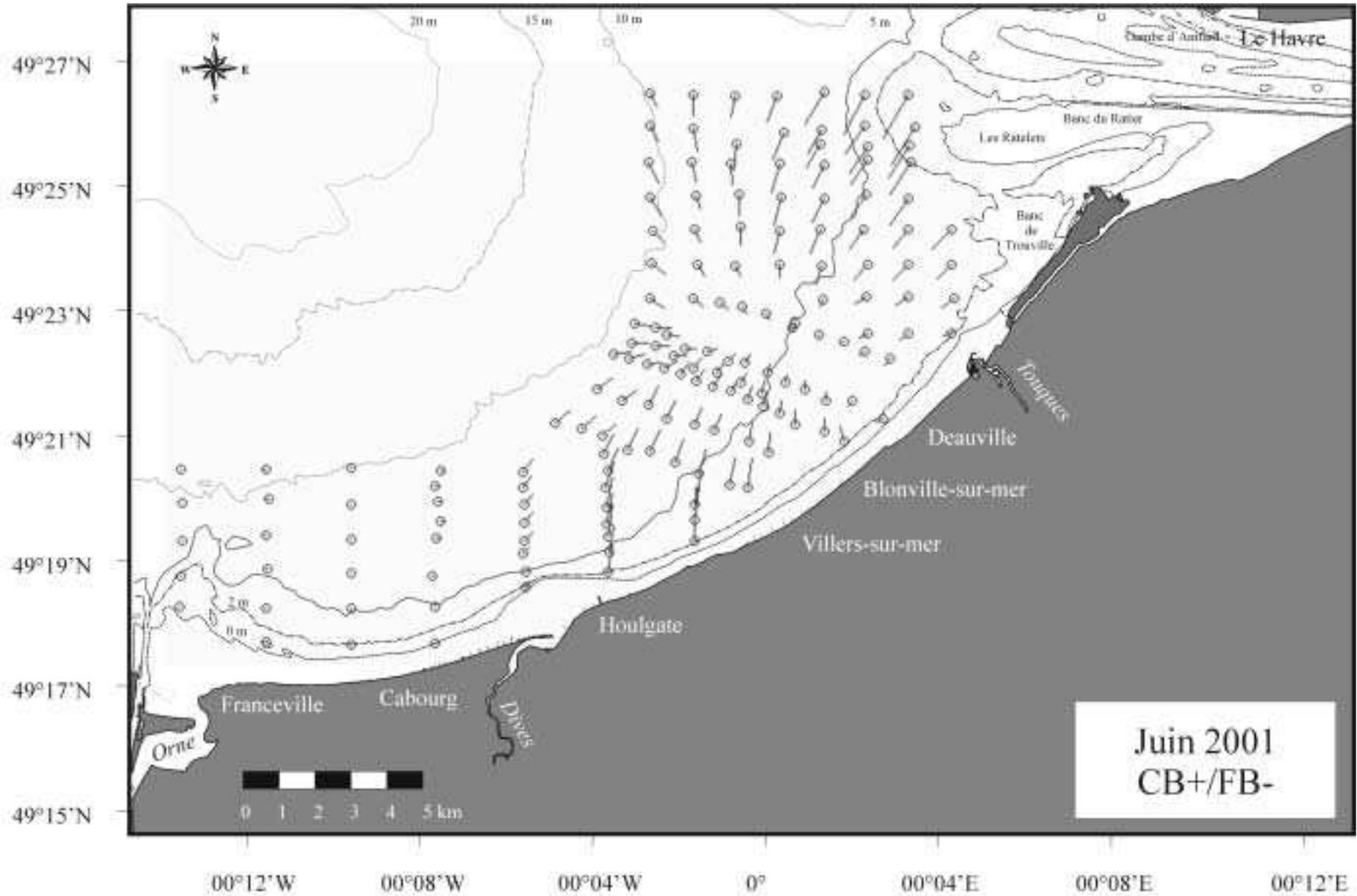
Le cas FB- montre quant à lui un transport en tout point dirigé vers l'est, en direction de l'embouchure de la Seine (*fig. III-49, p. 153*). La grille d'échantillonnage étant très régulière, le module des vecteurs permet d'apprécier l'intensité des transports qui apparaît comme très homogène en période estivale sur l'ensemble du secteur (exception faite de points situés les plus à l'ouest où les sédiments sont plus grossiers, moins mobiles).

### 5.3 Confrontation des résultats de la méthode de Gao et Collins et des observations *in situ*

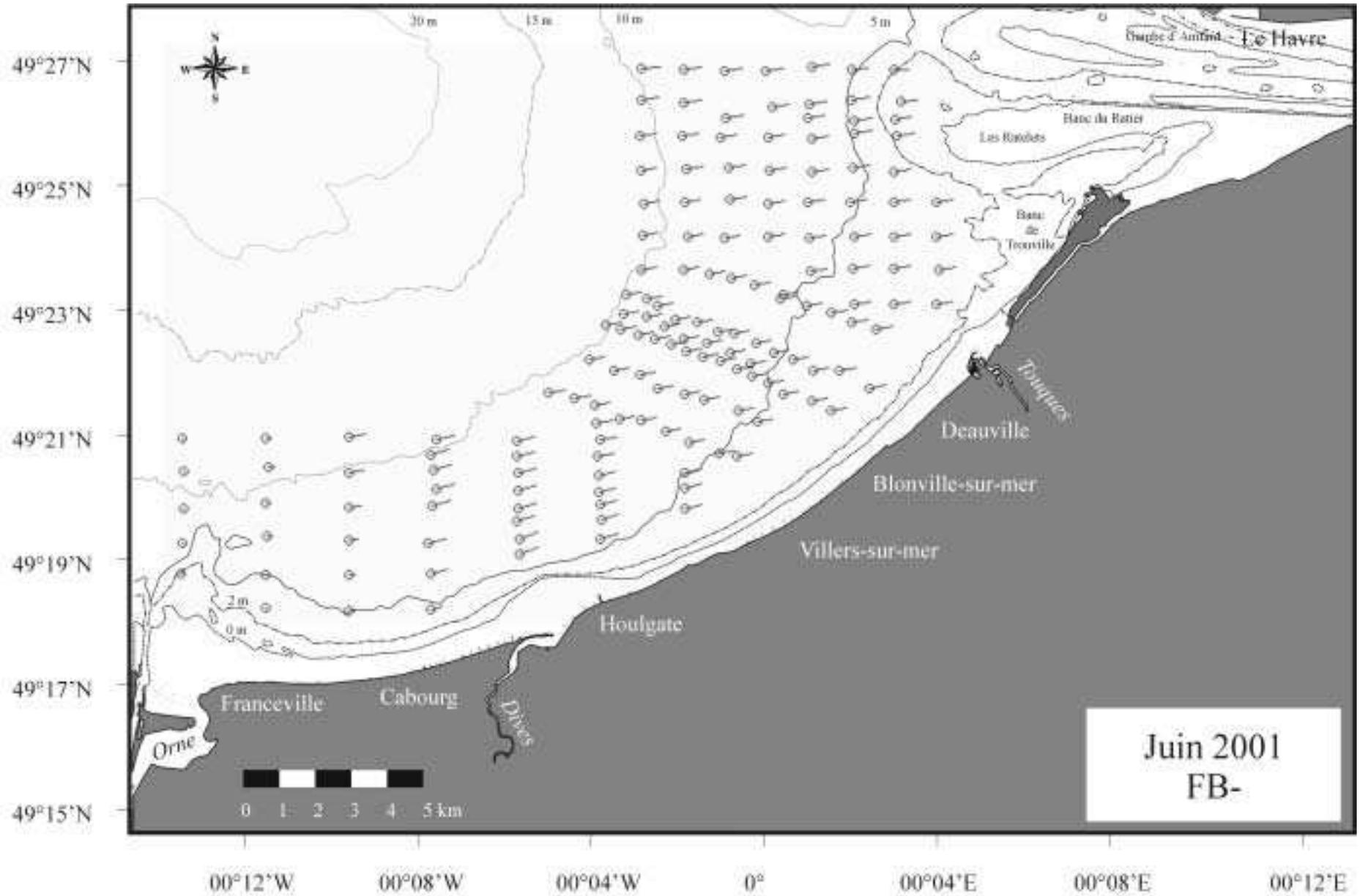
La confrontation nécessaire des résultats des vecteurs de transport calculés par la méthode de Gao et Collins avec les sens observés avec des moyens directs d'investigation n'est encore que partiellement réalisée. D'une manière générale, par l'observation de figures de transport par charriage (e.g. rubans, queue de comète, mégarides), il est possible de préciser la direction et le sens des transits sédimentaires des fractions granulométriques mobiles. Les sédiments sablo-graveleux de la Baie de Seine centrale et occidentale sont de bons indicateurs morphosédimentaires dans l'analyse des directions de transport (Auffret *et al.*, 1984; Auffret & d'Ozouville, 1986). Par contre, la majeure partie de la Baie de Seine orientale montre peu de structures sédimentaires dans les sédiments homogènes fins: elles se limitent à des sillons coquilliers et des queues de comète associées à des obstacles, ainsi que des rubans sableux au large de Ouistreham traduisant un transport résiduel du NW vers le SE (*fig. III-50, p. 154*). Nos données de sonar à balayage latéral ont été acquises en période estivale (meilleures conditions météorologiques), et ne permettent donc pas d'observer de potentielles figures de transport depuis la côte vers le large comme le laisse suggérer les transits en hiver (*figs. III-44 et III-45*).



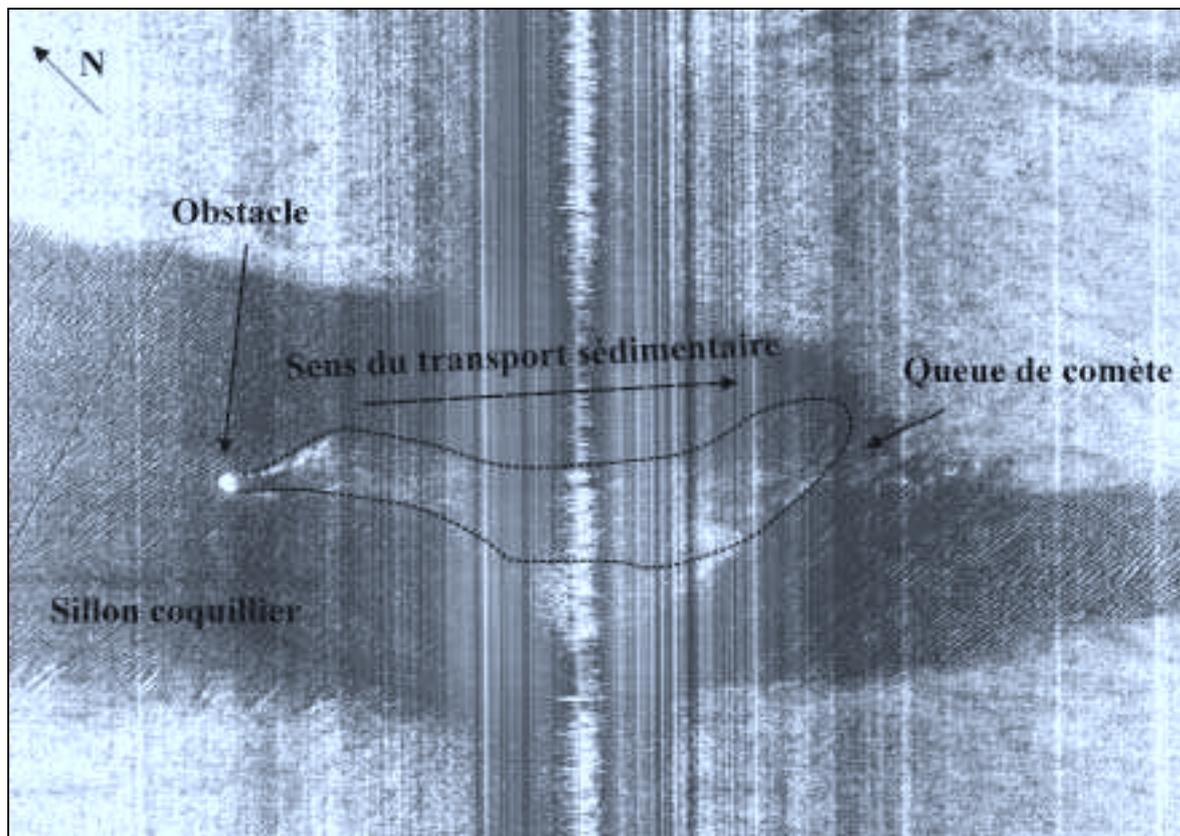
**Figure III-47.** Vecteurs de transport résiduel calculés par la méthode de Gao et Collins pour les cas CB+ en Baie de Seine sud-orientale en juin 2001.  
 ○ point d'échantillonnage, — le segment indique le sens du transport.



**Figure III-48.** Vecteurs de transport résiduel calculés par la méthode de Gao et Collins pour les cas CB+/FB- en Baie de Seine sud-orientale en juin 2001. ○ point d'échantillonnage, — segment indique le sens du transport.

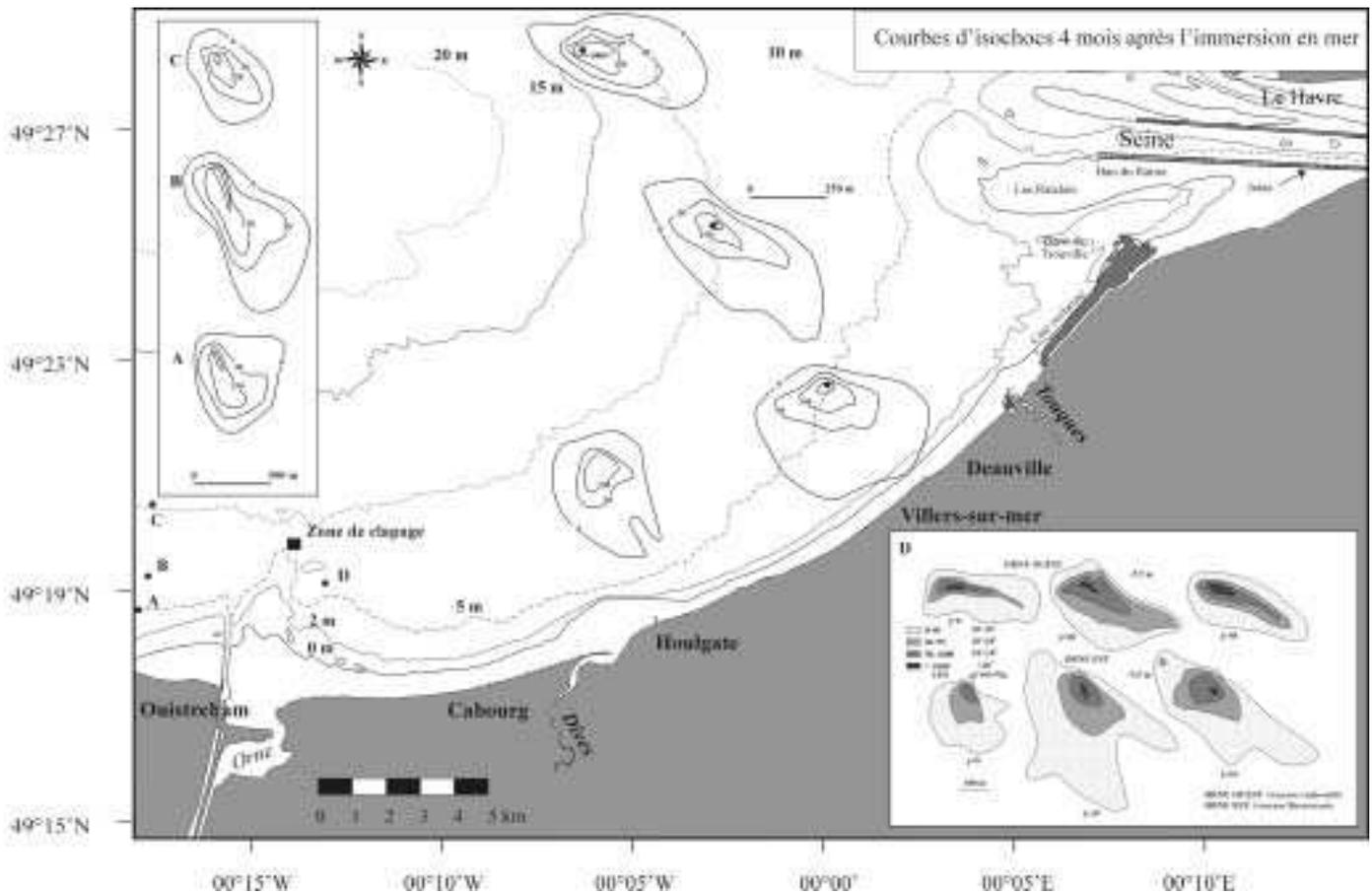


**Figure III-49.** Vecteurs de transport résiduel calculés par la méthode de Gao et Collins pour les cas FB- en Baie de Seine sud-orientale en juin 2001.  
 ○ point d'échantillonnage,     le segment indique le sens du transport.



**Figure III-50.** Exemple du sens du transport sédimentaire directement déduit du sonar à balayage latéral en Baie de Seine sud-orientale: obstacle et queue de comète associée.

Lors d'études antérieures (1979 et 1983), des campagnes de mesure à l'aide de traceurs radioactifs artificiels avaient été réalisées en Baie de Seine sud-orientale sur 5 sites expérimentaux répartis entre Ouistreham et Honfleur (Avoine *et al.*, 1984b; Avoine *et al.*, 1986). Le type de matériel, choisi afin de caractériser la direction et l'intensité des mouvements sédimentaires par charriage, était du verre broyé marqué au  $^{147}\text{Nd}$  et  $^{192}\text{Ir}$  simulant les sables. Des traceurs fluorescents (juillet 1991, immersion de 1115 kg de sable) ont également été employés sur le site de Ouistreham à 1 km au SE de la zone de clapage des produits de dragage (*fig. III-51*, point D). Après un suivi de 5 mois, Avoine *et al.* (1993) avaient ainsi montré que la fraction la plus grossière (0,5-1 mm) est peu mobile et reste cantonnée autour du point d'immersion. Pour la fraction inférieure (0,16-0,5 mm), une "remontée" des sédiments vers le S-SE en direction de la côte est observée de l'ordre de  $4,5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ . Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par la méthode des traçages radioactifs (*fig. III-51*, point D). Le mouvement général des sables déduit des mesures de traceurs est dominé par l'influence des courants de marée, avec un courant de flot prédominant qui induit un transit vers l'est (point au large) et vers le SE près de la côte (*fig. III-51*). Sur le site expérimental au large de Ouistreham, l'action de la houle dominante W-NW associée aux courants de marée induit aussi ce mouvement des traceurs vers la côte. Les sables qui transitent en direction de l'estuaire par charriage représenteraient des volumes peu importants, de l'ordre de  $1,5 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$  par jour.



**Figure III-51.** Résultats des expériences de traceurs radioactifs et fluorescents sur différents sites de la Baie de Seine sud-orientale (d'après Avoine et al., 1984b; Avoine et al., 1986). A 1 km au SE du dépôt de dragage de Ouistreham, des essais de traceurs radioactifs et fluorescents ont été réalisés (d'après Avoine, 1992). Cartouche à gauche: résultats de la dispersion des traceurs à l'ouest d'Ouistreham; cartouche en bas à droite: comparaison entre les deux techniques de traçage, radioactifs et fluorescents.

Les suivis de traceurs radioactifs et fluorescents montrent globalement les mêmes directions générales de transport que celles obtenues par la méthode de Gao et Collins, mais ces données de traceurs restent très ponctuelles (fig. III-51). L'intérêt d'utiliser l'approche de Gao et Collins est de pouvoir pallier ce manque d'information et d'obtenir rapidement des sens de transport.

#### 5.4 Synthèse: les transports sédimentaires à l'échelle saisonnière en Baie de Seine orientale d'après la méthode de Gao et Collins

L'échantillonnage réalisé au cours de deux missions (en février 2000 et juin 2001) sur un même secteur géographique a permis d'aborder un aspect nouveau et original de la méthode de Gao et Collins, en mettant en évidence un sens de transit sédimentaire variable en fonction des saisons. Dans cette étude, le modèle de Gao et Collins (1991; 1992) est

capable de reproduire des directions de transit saisonnier en Baie de Seine sud-orientale, rendu possible par un changement important de la couverture sédimentaire (teneurs en fraction fine  $< 50 \mu\text{m}$ ) des fonds entre les deux missions de prélèvement (*cf.* § 4.2.3).

#### Situation hivernale:

Dans les trois cas, un sens de transport depuis l'embouchure vers le SE ou le S apparaît avec une différence majeure dans les secteurs de convergence de ces vecteurs: pour le cas CB+ et CB+/FB- ils convergent au droit des Ratelets entre -5 et -10 m, pour le cas FB- ils se dirigent vers la zone de la vasière temporaire. Le cas FB- peut être considéré comme un indicateur de la dynamique saisonnière des sédiments les plus fins (i.e. sables fins et vases). En effet, la superposition des cartes de répartition de la fraction fine et celle des transports résiduels montre une très bonne similitude entre le dépo-centre représenté par la vasière subtidale et le site de convergence des vecteurs calculés (*fig.* III-52a). Une telle approche avait déjà été proposée par Gao et Collins (1992), en reliant les secteurs de convergence des vecteurs résiduels de transport à des zones de sédimentation fine.

Le cas CB+ montre également une dynamique orientée de la côte vers le large, entre Cabourg et jusqu'à Blonville-sur-Mer, liée au matériel sableux redistribué depuis la plage vers le domaine subtidal par l'action destructrice des fortes houles hivernales.

#### Situation estivale, étiage:

En période d'étiage, une dynamique "simple" s'établit avec un transit dirigé vers l'estuaire de la Seine (*fig.* III-52b). En été, les sédiments fins sont réintroduits dans le système estuarien avec la décroissance des débits de la Seine (étiage) et sous l'influence prédominante des courants de flot. Cette dynamique est bien représentée par le cas FB-. Le cas CB+, caractérisant une dynamique de plus forte énergie (*cf. annexe 3*), serait présentatif des transits qui mobilisent les sédiments les plus grossiers; les vecteurs obtenus convergent en direction du NW de Deauville sur un secteur plutôt en engraissement (*cf. chapitre IV*, § 3.2.1.2) (Volmat, 1929).

#### Bilan:

Les vecteurs de transport résiduel CB+ et CB+/FB- montrent indépendamment des saisons un sens toujours dirigé NE  $\rightarrow$  SW vers des zones de convergence différentes, respectivement au droit des Ratelets en hiver et au NW de Deauville en été (*tabl.* III-4). Ce résultats suggère un transit quasi-permanent des sables à proximité de l'embouchure de la Seine entre le Banc du Ratier et des secteurs subtidaux peu éloignés.

Le cas FB- montre des variations saisonnières des sens de transport: des apports plutôt en hiver et une redistribution en direction de l'estuaire en période estivale. Les vecteurs observés depuis l'embouchure de la Seine vers le secteur de la vasière subtidale sont probablement liés au transit des sables envasés qui composent le banc Sud de l'embouchure de la Seine, acheminés vers le SW pour l'action des fortes houles hivernales (*fig. I-21, p. 45*) et des courants de marée.

Ces conclusions sur l'attribution d'une dynamique à une certaine classe de sédiments en fonction des cas étudiés (CB+ et FB-) ont été proposées dans des études récentes (Ehrhold & Auffret, 1996; Le Bot *et al.*, 2001). La connaissance des populations granulométriques susceptibles d'être mobilisées ou non par charriage et par suspension est donc nécessaire pour une bonne utilisation de cette méthode.

Saisons	Hiver (février 2000)		Eté (juin 2001)	
Secteur	Ouest	Est	Ouest	Est
Cas				
CB+	SSE → NNW (0 – 10 m) NE → SW (10 – 20 m)	NE → SW	SW → NE (0 – 7 m) N → S (7 – 10 m)	NE → SW
CB+/FB-	Schéma identique à CB+		Schéma identique à CB+	
Convergence	Convergence des vecteurs vers les fonds plus grossiers (-15 m et -5/-10 m en face des Ratelets)		Convergence des vecteurs vers les fonds au NW de Deauville	
FB-	W → E (0 - 10 m) NW → SE (10 – 20 m)	N → S	W → E	
Convergence	Convergence des vecteurs vers les fonds subtidaux entre Villers-sur-mer et Deauville, site des vasières subtidales		/	

**Tableau III-4.** Bilan des différents sens de transport sédimentaire observés en février et juin 2001 selon les résultats obtenus pour les trois cas choisis par la méthode de Gao et Collins. La distinction des secteurs correspond au secteur à l'ouest et à l'est de Villers-sur-mer.

La méthode de Gao et Collins suggère que la dynamique sédimentaire déplace différents stocks de matériaux de provenances variées (marins, estuariens et littoraux) avec le rôle majeur des transferts entre l'estuaire de la Seine et les fonds subtidaux adjacents, et vice-versa. L'origine de ces sédiments et spécialement des particules fines font l'objet du paragraphe suivant.

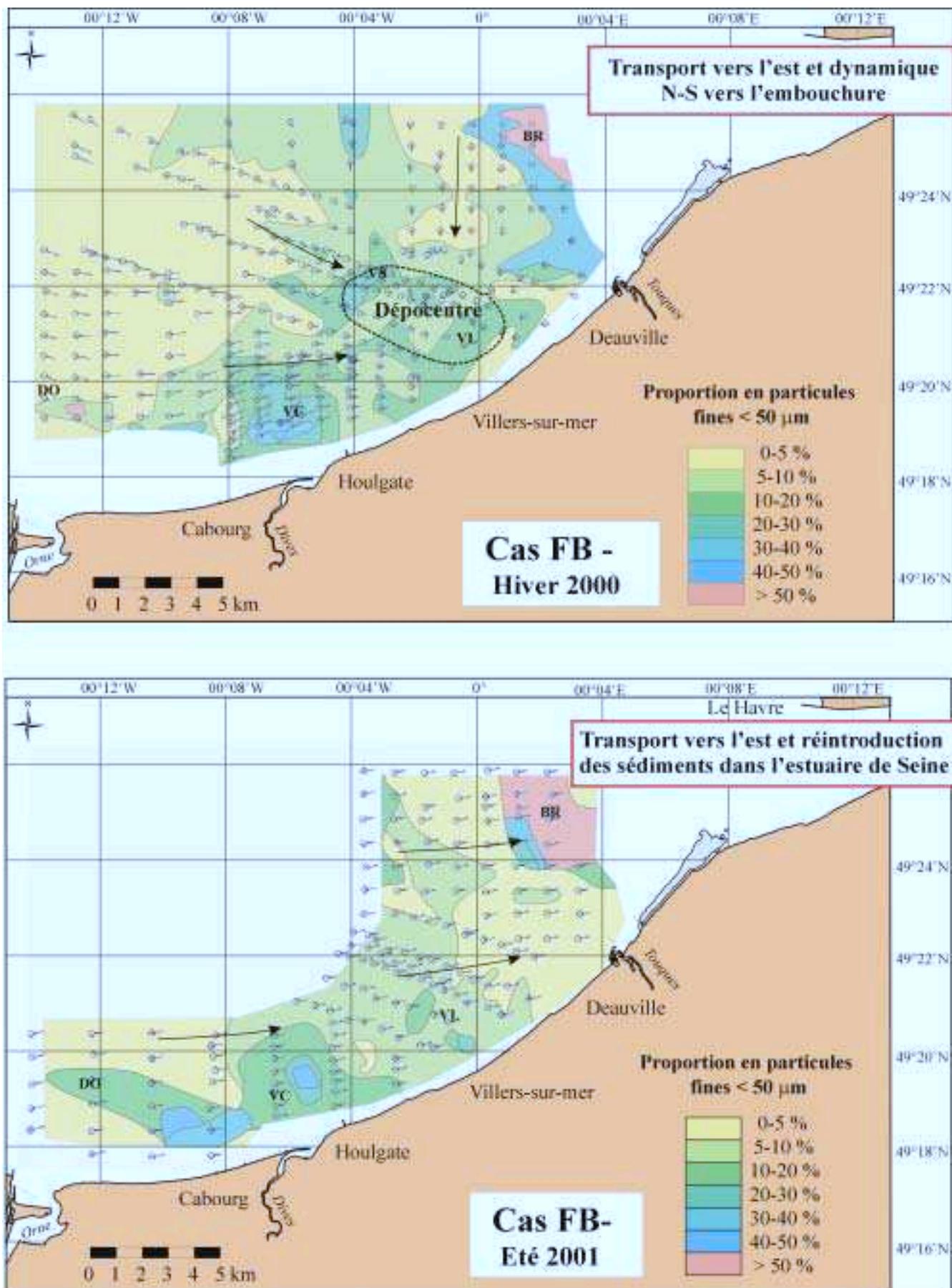


Figure III-52. Superposition des cartes des teneurs en particules fines (< 50 μm) dans les sédiments superficiels et des vecteurs de transports résiduels pour le cas FB- en février 2000 (a) et juin 2001 (b) en Baie de Seine sud-orientale.

## 6. Origine des sédiments fins en Baie de Seine sud-orientale

Les travaux publiés sur l'origine des sédiments présents dans la baie et l'estuaire de Seine ont permis d'envisager un grand nombre de sources possibles, d'origines à la fois continentale et marine. La distinction entre les différentes sources de matériaux fins, susceptibles de contribuer à l'envasement de la Baie de Seine sud-orientale, nécessite de trouver un ou plusieurs marqueurs permettant de les distinguer les unes des autres. Ces traceurs ont donc été recherchés en utilisant de façon combinée des techniques analytiques disponibles au sein du laboratoire M2C (diffractomètre X) ou en collaboration avec l'IPSN/CEA à Cherbourg (radionucléides). Ces travaux constituent une première étape de réflexion sur l'importance de certaines des sources caractéristiques dans l'envasement.

### 6.1 Sources de matériel sédimentaire fin dans la zone d'étude : bilan des connaissances

#### 6.1.1 Flux particulières d'origine continentale

##### 6.1.1.1 Apports actuels de particules fines en provenance du bassin amont de la Seine

Les sédiments fins de l'estuaire de la Seine sont essentiellement originaires du bassin versant (Avoine, 1981; Avoine & Larsonneur, 1987; Dupont *et al.*, 1994; Guézennec *et al.*, 1999). D'une manière générale, au cours du transfert amont-aval du matériel particulaire, on observe une perte de 25 à 30% du flux annuel du bassin versant amont<sup>8</sup> soit 0,15 à 0,20 x 10<sup>6</sup> tonnes (Guézennec *et al.*, 1999; Dupont *et al.*, 2001). Les données du débit solide de la Seine sont celles estimées au barrage de Poses à partir d'une relation entre le débit liquide et la concentration en MES (Avoine, 1986a; Meybeck *et al.*, 1998; Guézennec, 1999). Cependant, les modalités du transport particulaire depuis le barrage de Poses jusqu'à l'embouchure de la Seine sont complexes. Les études menées par Guézennec (1999) et Guézennec *et al.* (1999) ont permis de mieux connaître les modalités du transport des MES au cours des cycles de crue, reliant la charge solide en suspension au débit solide sur la portion de l'estuaire située entre l'amont de Rouen et le Val-des-Leux (60 km à l'aval du barrage). Il est ainsi montré que les proportions de transfert et de piégeage de sédiments fins dépendent à la fois (i) de l'importance des crues et de ses apports particuliers et (ii) de l'historique du débit, qu'il s'agisse soit d'une première crue annuelle, soit d'une crue succédant à une ou plusieurs crues antérieures. En particulier, Guézennec *et al.* (1999) soulignent que le bilan de transfert des MES dans l'estuaire de la Seine doit être établi à l'échelle de l'année et non de la saison, compte tenu des transferts différés, très discontinus

---

<sup>8</sup> La distinction entre l'amont et l'aval dans l'estuaire de la Seine correspond à la limite de l'intrusion saline: estuaire amont, entre le barrage de Poses et Vieux-Port (40 km d'Honfleur); estuaire aval, entre Vieux port et l'embouchure.

et complexes, des particules fines (e.g. stockage dans les infrastructures portuaires de Rouen ou sur les vasières intertidales situées entre Poses et la partie aval de l'estuaire).

Dupont *et al.* (2001) ont proposé un bilan annuel des matériaux en suspension apportés, stockés, ou extraits dans l'estuaire aval de la Seine depuis Poses (*tabl. III-5*) qui prend en compte:

- 1/ la charge solide issue du bassin versant transitant au barrage de Poses, de l'ordre de 600 000 tonnes par an,
- 2/ la production biologique (phytoplanctonique) estimée à 60 000 tonnes par an,
- 3/ les matériaux de dragages extraits des infrastructures du port de Rouen et du chenal de navigation, de l'ordre de 200 000 tonnes par an.

Position	Amont du barrage de Poses	Estuaire amont		
Apports et nature des retraits de matériaux fins	Charge fluviale annuelle à Poses	Apports du bassin versant intra-estuarien (e.g. MES transportées par les affluents de la Seine: 5 à 6% des apports annuels intra-estuariens, rejets urbains et industriels)	Production biologique intra-estuarienne	Retrait de matériaux de dragages (port de Rouen et chenal de navigation)
Bilan quantitatif	+ 600 000 à + 700 000 t.an <sup>-1</sup>	+ 60 000 t.an <sup>-1</sup>	+ 60 000 t.an <sup>-1</sup>	- 200 000 t.an <sup>-1</sup>
	min: 200 000 t; max: 1 000 000 t sur la période 1941-1984 (Avoine, 1986a)	+ 120 000 t.an <sup>-1</sup> (~ 20% des apports annuels à Poses)		
Total	~ 500 000 t.an <sup>-1</sup> en moyenne			

**Tableau III-5.** Bilan quantitatif des échanges annuels dans l'estuaire de la Seine (d'après Avoine, 1986a; Guézennec *et al.*, 1999; Guézennec, 1999; Lesourd, 2000; Dupont *et al.*, 2001).

Aux bilans d'apports fluviaux, il faut ajouter les apports des affluents de la Seine dont l'Eure, non pris en compte sauf selon une "pondération" (Avoine, 1994). Les données ne constituent que des estimations. En effet, le bilan proposé (*tabl. III-5*) n'intègre pas des apports comme:

- 1/ le lessivage des pentes et le ruissellement sur le bassin versant intra-estuarien. Les sols de la région Haute-Normandie sont parmi les plus lessivables du territoire français (Jamagne *et al.*, 1995; Blanchart *et al.*, 1999; King *et al.*, 1999),
- 2/ l'érosion des alluvions reliques argilo-silteuses des fonds du lit chenalisé et des berges non stabilisées de certains tronçons (accrue par le batillage lié à l'activité maritime, BIOTEC, 2002),

3/ les MES originaires de l'écoulement karstique et introduites *via* la nappe alluviale.

A l'embouchure de la Seine, les flux particuliers qui arrivent et sortent du système estuarien sont également difficiles à estimer. Même si les flux et sources sont mieux connus grâce aux études menées dans le cadre du programme Seine-Aval, le régime de marée induit des échanges quasi-journaliers entre l'estuaire et la baie qui rendent ainsi les bilans sédimentaires très difficiles. De plus, les apports particuliers varient selon les échelles de temps considérées (journée, saison, année) et impliquent donc de réaliser des bilans intégrant les données de plusieurs années. Dans l'estuaire aval, les zones qui participent au stockage et aux apports de sédiments fins sont:

- 1/ le bouchon vaseux où la masse de sédiments fins stockée varie entre 20 000 à 300 000 t (Avoine *et al.*, 1981; Avoine, 1994),
- 2/ la crème de vase dans le chenal de navigation, qui résulte de la décantation d'une partie du bouchon vaseux, généralement en période de mortes-eaux par débit fluvial faible à moyen et de l'action des vagues lors des tempêtes,
- 3/ la vasière nord qui joue également un rôle important dans le cycle des sédiments fins à l'embouchure. Lors des périodes d'érosion de cette vasière intertidale, la remobilisation des dépôts apporte au système estuarien de l'ordre de 200 000 à 400 000 t de sédiments fins pendant une tempête de plusieurs jours (Lesueur & Lesourd, 1999; Lesourd *et al.*, 2003). Toutefois, ces résultats sont difficiles à intégrer dans des bilans de flux annuels car ces mouvements de stock sédimentaires évoluent lors de processus paroxysmaux (crues et tempêtes).

#### 6.1.1.2 Apports fluviaux du littoral du Calvados

Dans le bilan des apports, les MES d'origine fluviale expulsées par la Seine prédominent largement. Cependant, il faut également tenir compte des apports des trois exutoires du Calvados que sont, par ordre de débit liquide moyen annuel décroissant, l'Orne, la Dives et la Touques (40, 8 et 4 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). En 1979-1980, des études réalisées sur l'Orne avec un suivi saisonnier de la répartition des dépôts de sédiments fins dans l'estuaire et l'embouchure (Dubrulle, 1982; Dubrulle & Larssonneur, 1984) avaient montré que les sédiments fins sont expulsés pendant les crues hivernales (*fig. III-25, p. 118*). Les apports fluviaux de la Dives et de la Touques sont très modestes et les sédiments fins expulsés se déposent les principaux chenaux de navigation.

#### 6.1.1.3 Produits d'érosion des côtes du Calvados

L'érosion littorale, très discontinue dans le temps, concerne du matériel fin extrait des falaises jurassiques entre Cabourg et Blonville-sur-mer (falaises des Vaches Noires) et d'Hennequeville à Villerville. Le volume annuel de sédiment arraché aux falaises des

Vaches noires (~ 100 m de dénivelé) est estimé à 140 000 m<sup>3</sup> sur la base des travaux de Volmat (1929) avec, en moyenne, un recul des falaises de 0,33 m par an (établi à partir de relevés topographiques réalisés en 1834 et 1894). A ce bilan, il faut également ajouter le démantèlement des falaises d'Hennequeville avec un volume estimé à 36 000 m<sup>3</sup> par an, soit au total un apport issu de l'érosion littorale de l'ordre de 176 000 m<sup>3</sup> par an. Des travaux plus récents, réalisés par le Laboratoire Central Hydraulique de France (1984), confirment ces chiffres: contribution de 200 000 m<sup>3</sup> par an de matériaux originaires de l'érosion du littoral du Calvados entre Ouistreham et Honfleur.

En domaine de haut de plage au pied de ces falaises, les arrivées de matériel fin sont font soit par des coulées boueuses (*fig. III-53*), soit par de grands glissements de terrain qui apportent de grandes quantités de sédiments marneux (Flageollet *et al.*, 1987). Ces sédiments sont peu à peu lessivés par les vagues et la dérive littorale achemine ces matériaux vers l'est en longeant la côte. La glauconie a été utilisée comme marqueur potentiel de l'évolution des produits d'érosion issus de ces falaises (Germain, 1970; Larsonneur, 1971). En effet, la source essentielle de ce minéral pour le littoral et les fonds adjacents des côtes du Calvados est le Cénomaniens du sommet des falaises. Germain (1970) a étudié sur ce site, le long d'une radiale falaise - bas estran, l'évolution du pourcentage de glauconie dans le sédiment total par comptage des grains. Ce minéral était présent dans tous les échantillons analysés, le taux de glauconie s'abaissant rapidement du haut de plage vers le bas de l'estran: haut de plage: 6,9%; haut de l'estran: 3,9%; bas estran: 2,6%. Larsonneur (1971) a également utilisé ce minéral pour des échantillons marins à l'échelle de la Baie de Seine.



**Figure III-53.** Photographies des coulées boueuses sur l'estran au niveau des falaises des Vaches Noires (Villers-sur-Mer) en juin 2001 (vues depuis le large).

Ses résultats montrent que la dispersion en mer de la glauconie originaires du démantèlement des falaises des Vaches Noires (*fig. III-53*) suit la dynamique littorale avec un transfert des grains de glauconie d'ouest en est, pour finalement s'accumuler au niveau du prisme d'embouchure de la Seine.

En résumé, la contribution des apports issus de l'érosion littorale dans l'envasement direct de la Baie semble modeste surtout pour le secteur atelier de la vasière subtidale, puisque la majorité du matériel remanié est transféré vers l'est par la dynamique littorale. En particulier, le domaine subtidal des falaises des Vaches Noires (0 à -5 m CM) ne montre aucun signe d'envasement connecté aux épandages argilo-marneux sur la plage, confirmant ainsi la non pérennité des matériaux glissés, lessivés et transportés par les courants côtiers.

### 6.1.2 Flux particulières d'origine marine

#### 6.1.2.1 Apports d'origine planctonique

La part des apports particuliers liés à la production biologique est tributaire des cycles saisonniers. Elle devient notable dès l'apparition des premiers blooms phytoplanctoniques du printemps et jusqu'en septembre et octobre selon les cycles annuels (Brunet *et al.*, 1996; Aminot *et al.*, 1997). Lorsque cette production biologique se mêle aux apports engendrés par les premières crues d'automne (septembre-octobre), cette source particulière devient négligeable vis-à-vis des quantités de sédiments fins expulsés par l'estuaire. Toutefois, en période d'étiage, cette biomasse peut représenter près de 50% de la masse totale des concentrations pondérales totales des eaux de surface (Dupont *et al.*, 2001). Si cette contribution a été estimée à 60 000 t.an<sup>-1</sup> dans l'estuaire (Dupont *et al.*, 2001), cet impact semble cependant assez limité dans notre domaine d'étude. En effet, la lumière joue un rôle majeur pour la production primaire; or, le panache turbide, très étendu en hiver et au printemps, limite la pénétration de la lumière et repousse le bloom de diatomées plus au large (Aminot *et al.*, 1986; Aminot *et al.*, 1997). Au contraire, en été, la chute des débits de la Seine réduit l'extension du panache et permet une production primaire plus près de l'embouchure, le long de la côte (Videau *et al.*, 1998). Au large où la turbidité est faible, la lumière est également limitante en été pour les diatomées du fait de l'effet d'inhibition lié aux trop fortes intensités lumineuses (Cugier, 1999).

#### 6.1.2.2 Apports externes à la Baie de Seine

En Manche, les MES qui transitent vers l'est sont essentiellement d'origine océanique (Dupont *et al.*, 1991; Bailly du Bois *et al.*, 1997; Bailly du Bois & Guéguéniat, 1999). Les mesures de radioactivité artificielle des sédiments de la Baie de Seine et de l'estuaire ont mis en évidence la participation des MES marines dans le bilan des sources du matériel particulaire (Guéguéniat *et al.*, 1979; Garreau & Bailly du Bois, 1997). Toutefois, ces flux ont longtemps été sous-estimés compte tenu du manque de marqueurs géochimiques susceptibles de distinguer leur origine par rapport aux particules d'origine continentale.

Les marqueurs radioactifs sont de bons indicateurs pour la connaissance du transport sédimentaire et du déplacement des masses d'eau (Auffret *et al.*, 1986; Cutshall *et al.*, 1986; Garreau & Bailly du Bois, 1997; Spineanu, 1998). L'étude des MES transitant en Manche, marquées par le  $^{60}\text{Co}^9$  (caractéristique des rejets de la centrale de retraitement des déchets radioactifs de la Hague) a permis de mettre en évidence les apports vers la Baie de Seine orientale (Boust *et al.*, 1997; Spineanu, 1998; Boust, 1999). Ainsi, en Baie de Seine et dans l'estuaire, il a été détecté des particules d'origine marine ayant transité face à La Hague et qui ont été intégrées au sein du stock de matériel fin estuarien, jusqu'à plus de 80 km de l'embouchure de la Seine (Boust, 1997). Cette remontée de particules dans l'estuaire, imputée au pompage tidal (Guézennec *et al.*, 1999; Boust *et al.*, 2002) efficace par vives-eaux et étiage, peut constituer jusqu'à 25% du stock particulaire à Caudebec (~ 50 km de l'embouchure) (Boust, 1996).

#### 6.1.2.3 Erosion des argiles reliques subtidales au large de Cabourg

Dès 1977, Avoine mettait en évidence que la couverture sédimentaire de la Baie de Seine est peu épaisse voire absente entre Cabourg et Villers-sur-Mer mettant ainsi à l'affleurement des sédiments fins reliques (*fig. II-10, p. 73*). Compte tenu de cette observation, il suspecte l'érosion de ces dépôts fossiles dans la contribution à l'envasement de la Baie de Seine sud-orientale. Nos investigations au sonar à balayage latéral (*cf. § 6.2.1*) et par carottages (*cf. chapitre IV*) sur ces dépôts ont permis de confirmer et d'insister sur le contexte érosif actuel de ces argiles.

#### 6.1.2.4 Apports anthropiques: rejets de dragages le long des côtes du Calvados

Environ 40 000 m<sup>3</sup> (*tabl. III-6*) de sédiments sablo-vaseux accumulés dans la marina de Port-Deauville sont dragués tous les 3 ans (1991, 1994, 1997 et 2000). Ces sédiments sont rejetés à basse mer sur le bas estran par pompe hydraulique pendant les marées d'équinoxe de printemps, pour une évacuation maximum des rejets (communication Mme LEFRESNE, DDE Caen). Des dragages sont également réalisés au port de Deauville-Trouville (rive gauche de la Touques) et les sédiments sont acheminés sur un site d'immersion situé à 2,7 milles au NW du port (zone de dépôt d'explosifs, communication M Lucas, DDE Trouville).

---

<sup>9</sup> Certains radionucléides sont capables de se fixer sur les particules sédimentaires par les phénomènes d'adsorption. Ceux-ci sont dépendants de la surface spécifique des minéraux, la fraction argileuse montrant une surface de fixation par adsorption beaucoup plus importante que les autres fractions plus grossières. La quantité de radionucléides incorporée dans les sédiments est également dépendante des caractéristiques minéralogiques et cristallographiques des particules ainsi que du mode de formation de ces particules (Boust, 1997).

Les dragages dans les infrastructures portuaires de Ouistreham concernent quant à eux des volumes annuels beaucoup plus importants, de l'ordre de 500 000 tonnes. Hormis les dragages d'approfondissement du chenal d'accès aux passerelles TransManche de Ouistreham qui concernent principalement des sédiments sableux, les dragages d'entretien des fonds concernent des vases ou vases sableuses immergées en mer de manière discontinue.

Lieu	Année	Volumes dragués	Lieu de dépôt
<b>Port de Caen-Ouistreham</b>	1994, 1995, 1996 1986, 1992	200 000 m <sup>3</sup> 800 000, 600 000, 505 500 m <sup>3</sup> 2 x 500 000 m <sup>3</sup>	Site d'immersion en mer
<b>Port de Deauville</b>	1991, 1994 et 1997	3 x 40 000 m <sup>3</sup>	Rejet sur l'estran
<b>Port de Deauville-Trouville</b>	2001	100 000 m <sup>3</sup>	Site d'immersion en mer
	décembre 1991- février 1992	57 200 m <sup>3</sup>	
	1983-1984	79 000 m <sup>3</sup>	

**Tableau III-6.** Bilan et volumes des matériaux dragués depuis 1983 à Ouistreham et Deauville (Avoine, 1994; Alzieu, 1999).

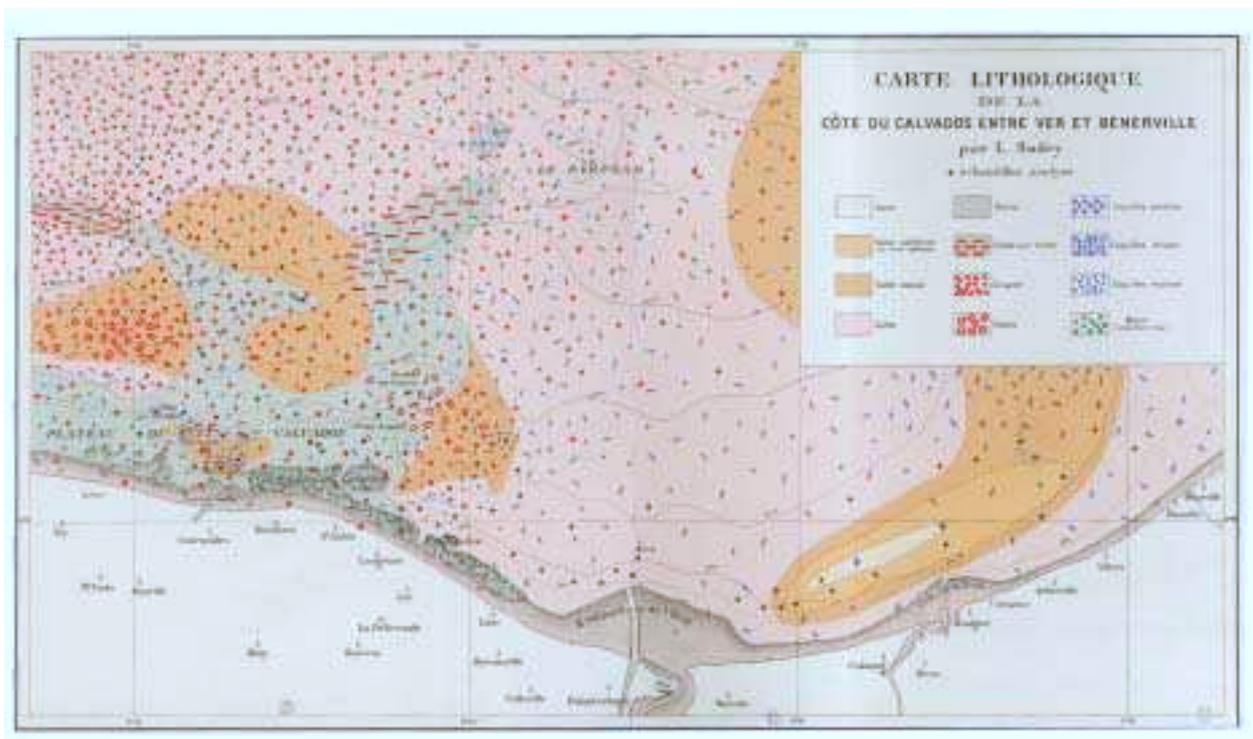
## 6.2 Sources de matériel sédimentaire fin dans la zone d'étude: nouvelles données

### 6.2.1 Erosion des argiles fossiles au large de Cabourg

Aucun des travaux antérieurs réalisés sur ce secteur n'avait cité la présence d'affleurements sous-marins créant de véritables micro-reliefs (Avoine, 1981; Auffret & d'Ozouville, 1986; Avoine, 1994). La synthèse des prélèvements réalisés entre 1977 et 1982 (Avoine, 1994) avait cependant permis de souligner des sédiments reliques épars subaffleurants. Les levés au sonar à balayage latéral effectués pendant ces mêmes années, en 1982 et 1983 (Auffret & d'Ozouville, 1986), n'ont jamais révélé d'échos acoustiques pouvant être interprétés comme des affleurements d'argiles reliques (Auffret, communication personnelle). Les études réalisées sur le même secteur 10 ans plus tôt par Larsonneur (prélèvements par dragages et bennes, 1971) vont également dans le sens d'une présence de ces argiles sous une faible couverture sédimentaire (Larsonneur, communication personnelle). Le résultat nouveau de nos études s'appuie sur la présence d'affleurements de ces argiles pouvant former des reliefs de l'ordre du ½ mètre (*fig. III-17, p. 110*).

### Rappel des études antérieures au large de Cabourg et place de notre travail

Le secteur au large de l'embouchure de la Dives est connu depuis le début des années 1908-1910 (*fig. III-54*) pour la présence de sédiments superficiels vaseux centrés sur l'isobathe -6 m CM (Thoulet, 1908-1909; Sudry, 1911). Ces vases et sables vaseux s'étendent en direction du large jusqu'à -8 m CM et vers la côte à -3 m CM. Cette zone a ultérieurement été cartographiée en 1970 par Germain, lequel constate que les limites d'envasement n'avaient guère varié depuis 1910. Dans son étude sur les processus sédimentaires de l'estuaire de la Dives, Germain (1970) précise que ces dépôts vaseux subtidaux ne peuvent être associés aux sédiments fins expulsés par ce fleuve côtier compte tenu de ses très faibles débits (moyenne annuelle de  $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Il n'apporte cependant aucune réponse à la présence de ces sédiments sur ce secteur mais Larsonneur (1971) suggère que ces vases se soient mises en place dans une zone d'énergie turbulente minimale, située entre la zone d'action dominante des vagues et celles des courant de marée, soit -6 m CM au large du Cabourg. Dans les années 1980, Avoine (1981; 1984a; 1994) retrouve également ce secteur envasé qui montre peu de fluctuations saisonnières, contrairement au reste de la Baie de Seine sud-orientale.



**Figure III-54.** Carte de la nature des sédiments en Baie de Seine orientale entre Ver-sur-mer et Bénerville (Sudry, 1911). Les vases sont présentées avec un figuré de hachures jaunes et les vases sableuses et sables vaseux avec un dégradé d'orangé.

Les nouvelles données de sonar à balayage latéral acquises lors des campagnes VASTEDEBA montrent une extension des argiles reliques affleurantes dans la même zone géographique que les sédiments vaseux cartographiés depuis le début de XX<sup>ème</sup> siècle. Il est donc fort probable que ce secteur envasé soit associé à la présence sous-jacente de ces

argiles reliques qui contribuent par leur érosion à la formation d'un dépôt envasé persistant, à l'échelle du siècle, au large de Cabourg. Ces argiles reliques, en relief par rapport au fond, sont directement exposées aux agents hydrodynamiques locaux et sont en particulier soumises à l'action érosive générée par les houles et surtout les tempêtes. Des mesures d'érodibilité ont été réalisées sur ce type de sédiment lors des missions VASTEDEBA 2001 par l'équipe de la DEL d'IFREMER associée au programme Seine-Aval II (P. Le Hir et P. Bassoullet). Le but de cet appareil, en cours de développement, est de mesurer le seuil critique hydrodynamique à partir duquel les sédiments sont entraînés par un courant hydraulique. Les argiles reliques n'ont pas été remises en suspension du fait de leur forte compacité. Nous avons mesuré la cohésion de cette formation: elle est supérieure à  $10 \text{ KN.m}^{-2}$  (cf. *chapitre IV*, §.3.2.2.5). L'érosion de ces fonds n'est alors possible que par l'activité turbulente des vagues. L'abrasion par les sédiments sableux et les débris coquilliers transportés sur le fond, en particulier lors des périodes de fort coup de vent ainsi que l'action fousseuse de certains organismes (pétricoles) accroissent cette érosion.

En résumé, ces affleurements reconnus lors des missions VASTEDEBA en 2000 et 2001 suggèrent une réelle érosion des fonds depuis les dernières études menées dans le secteur. Dès 1929, Volmat mettait en évidence par la comparaison de cartes bathymétriques de 1834 et 1913 une érosion moyenne annuelle des fonds estimée à 0,68 m entre Le Havre et Dives-sur-Mer. Cette érosion serait accrue depuis 20 ans, avec la mise à l'affleurement d'argiles reliques entre Cabourg et Villers-sur-Mer. Ces sédiments fins fossiles participent donc, au moins localement, à l'envasement de la Baie de Seine sud-orientale. Leur contribution à long-terme (pluri-annuel) doit être prise en compte dans le bilan des particules fines du système estuaire-Baie de Seine.

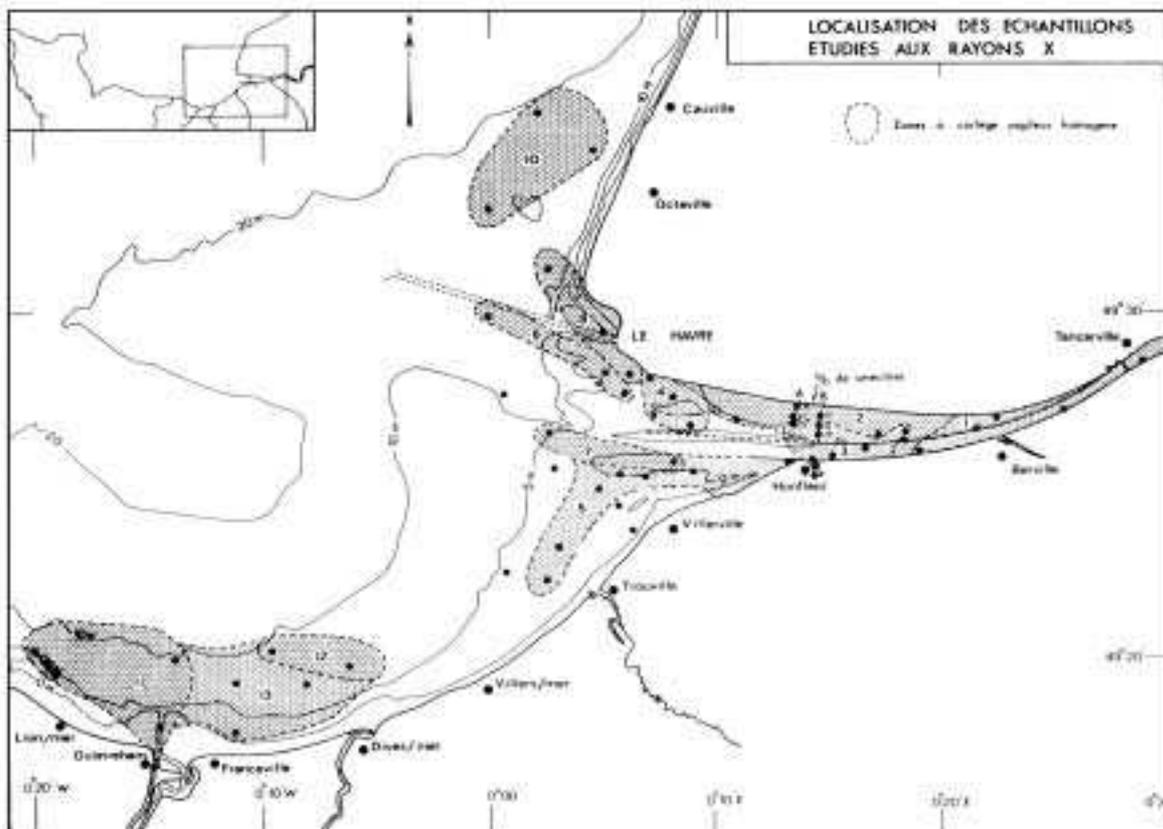
#### 6.2.2 Nouveaux marqueurs minéralogiques et géochimiques des sédiments fins (silts et argiles)

Une étude a été entreprise sur les sédiments fins de Baie de Seine sud-orientale afin de rechercher des marqueurs spécifiques des sources d'apport. Les nouvelles séries d'analyses portent sur (i) les dépôts fins observés en mars 1999 en recouvrement sur les sables, (ii) les sédiments envasés qui constituent la couverture sédimentaire superficielle et (iii) les sédiments argileux reliques affleurants. Les résultats sont comparés aux caractéristiques des MES et des sédiments de l'embouchure de la Seine. Les nouvelles séries de mesures minéralogiques et géochimiques, sur les cortèges argileux et les concentrations de radionucléides, ont permis de mettre en évidence l'importance de certaines sources de fraction fine, jusqu'alors sous-estimées, dans l'envasement de la Baie de Seine sud-orientale.

### 6.2.2.1 Cortège argileux des sédiments fins superficiels

Les minéraux argileux peuvent être utilisés comme des marqueurs des sources (Chamley, 1989) et des processus sédimentaires en domaine côtier soumis à des apports fluviaux (e.g. Karlin, 1980; Park & Khim, 1992; Segall & Kuehl, 1992).

Dans la zone d'étude, la composition du cortège argileux des sédiments fins superficiels a fait l'objet de travaux antérieurs concernant les embouchures fluviales de la Seine (Germaneau, 1968), de l'Orne (Fily, 1967; Dubrulle, 1982) ou de la Dives (Germain, 1970). Malgré les faibles variations dans les pourcentages des différents minéraux identifiés, Avoine (1981) a synthétisé les données à l'échelle de la Baie de Seine orientale et proposé une distinction entre zones minéralogiques (*fig. III-55*). Dans le domaine oriental, il a ainsi distingué cinq domaines entre l'embouchure de la Seine et l'ouest de Ouistreham. Dans l'embouchure de la Seine, la composition minéralogique des dépôts vaseux reste assez homogène: 35-40% d'illite, 30-35% de kaolinite, 20-30% de smectite et au maximum 5% de chlorite (*tabl. III-7*).



**Figure III-55.** Zonéographie des cortèges argileux dans l'estuaire de la Seine et dans la partie orientale de la Baie de Seine (Avoine, 1981).

Les sédiments prélevés sur la vase nord de l'embouchure se distinguent toutefois, avec des pourcentages un peu supérieurs en illite (45-50%) et chlorite (5-10%). Entre

Ouistreham et Dives-sur-mer, les variations du cortège argileux sont plus importantes. Il y a une homogénéité entre les sédiments prélevés dans le chenal d'accès au port de Ouistreham et ceux observés à l'embouchure au NW et SE (zones n°11 et 12, *fig. III-55*). Par contre, vers l'est, deux domaines sont différenciés, l'un au large de l'embouchure de la Dives et l'autre en position intermédiaire entre Franceville et Dives-sur-mer présentant tous les deux une plus grande abondance en chlorite et illite par rapport à l'ensemble des mesures réalisées dans l'estuaire de la Seine et la baie. Toutefois, ces résultats doivent être utilisés avec prudence puisque les résultats obtenus par Dubrulle (1982) montrent des différences notables avec ceux d'Avoine (1981). Ces divergences peuvent être expliquées par des changements de nature du sédiment lors des variations des conditions hydrologiques.

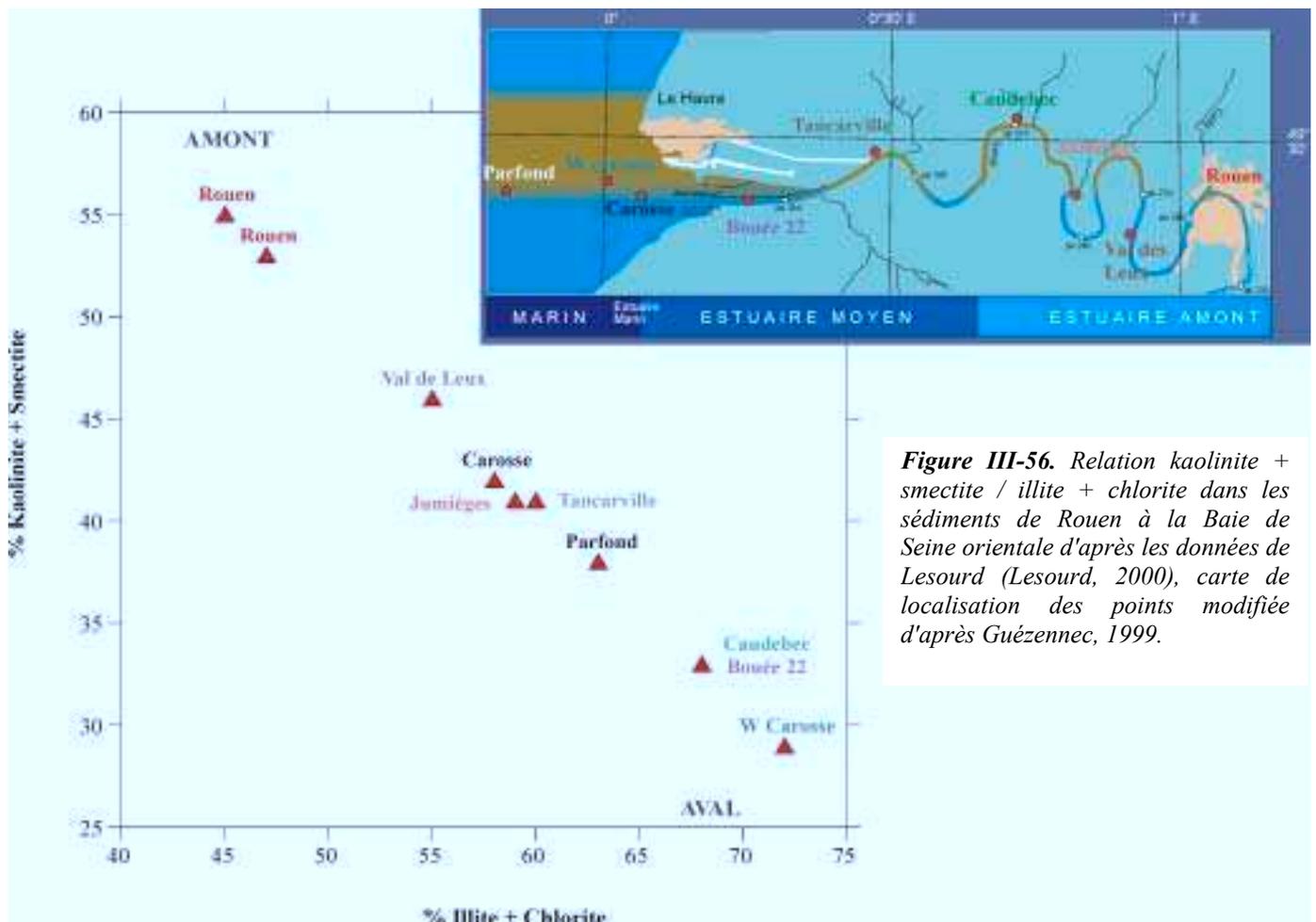
Zones	Auteurs	Illite %	Kaolinite %	Smectite %	Chlorite %	Interstratifiés %
Estuaire et embouchure de l'Orne	Avoine (n°11 et 13)	45	20-25	20-25	5-10	\
	Dubrulle (crue et étiage)	35-45	20-38	12-14	10-15	Rares - 6
Large de l'embouchure de la Dives	Avoine (n°12)	50-55	15	15-20	15-20	\
	Dubrulle (crue)	37-40	24-30	11-18	10-13	4
Estuaire de Seine	Avoine (n°1,2 et 3)	35-40	30-35	20-30	Traces - 5	\
Vasière Sud du Havre	Avoine (n°4)	45-50	25-35	20	5-10	\
Embouchure de la Seine	Avoine (n°5, 6, 7 et 8)	35-45	15-30	25-30	5-10	\
Octeville	Avoine (n°10)	40-45	20	30-35	5	\

**Tableau III-7.** Composition des cortèges argileux dans les différentes zones en figure III-61, d'après les données issues d'Avoine (1981) et de Dubrulle (1982).

Au cours de mon travail, l'étude de la minéralogie des argiles et de leurs pourcentages relatifs a été entreprise sur une série d'échantillons d'origine et de nature variées: vase fluide déposée en période hivernale (5 analyses), sable envasé de la Baie de seine sud-orientale (radiale FLUXMANCHE, 17 échantillons) et argiles fossiles subtidales (50 analyses). En outre, une compilation des études sur les cortèges argileux en Baie de Seine et dans l'estuaire même de la Seine a été réalisée (44 sets de données, *tabl. III-8*).

Auteurs	Année	Site d'étude	Nombre d'analyses
Lesourd	2000	Estuaire et embouchure de la Seine	9
Spineanu	1998	Baie de Seine	7
Dubrulle	1982	Embouchure de l'Orne et de la Dives	8
Avoine	1981	Estuaire de la Seine, baie de Seine orientale	15
Germaneau	1969	Estuaire de la Seine	5

Lesourd (2000) a montré que, de l'amont à aval de l'estuaire de la Seine à la Baie de Seine, il existe une évolution des proportions des minéraux argileux dans les sédiments et les MES. Les minéraux argileux se répartissent selon un champ de variation caractérisant d'une part un pôle continental marqué par des argiles d'altération (kaolinite+smectite) et d'autre part un pôle marin caractérisé par des argiles détritiques d'origine armoricaine (illite+chlorite) (*fig. III-56a*). Trois points (Caudebec, la Carosse et le Parfond) ont toutefois des signatures argileuses qui s'écartent du schéma général (*fig. III-56a*); elles sont attribuées à des sources locales (Caudebec) et à des lieux de Baie de Seine (la Carosse et le Parfond) soumis à des mélanges de matériel, marin et continental (i.e. apports de crue).



	Illite %	Kaolinite %	Smectite %	Chlorite %	Interstratifiés %
<b>Vase fluide</b>	40	30	30	0	\
<b>Sables envasés</b>	40	20	30	10	Traces - 5
<b>Argiles fossiles</b>	45	22	20	12	5

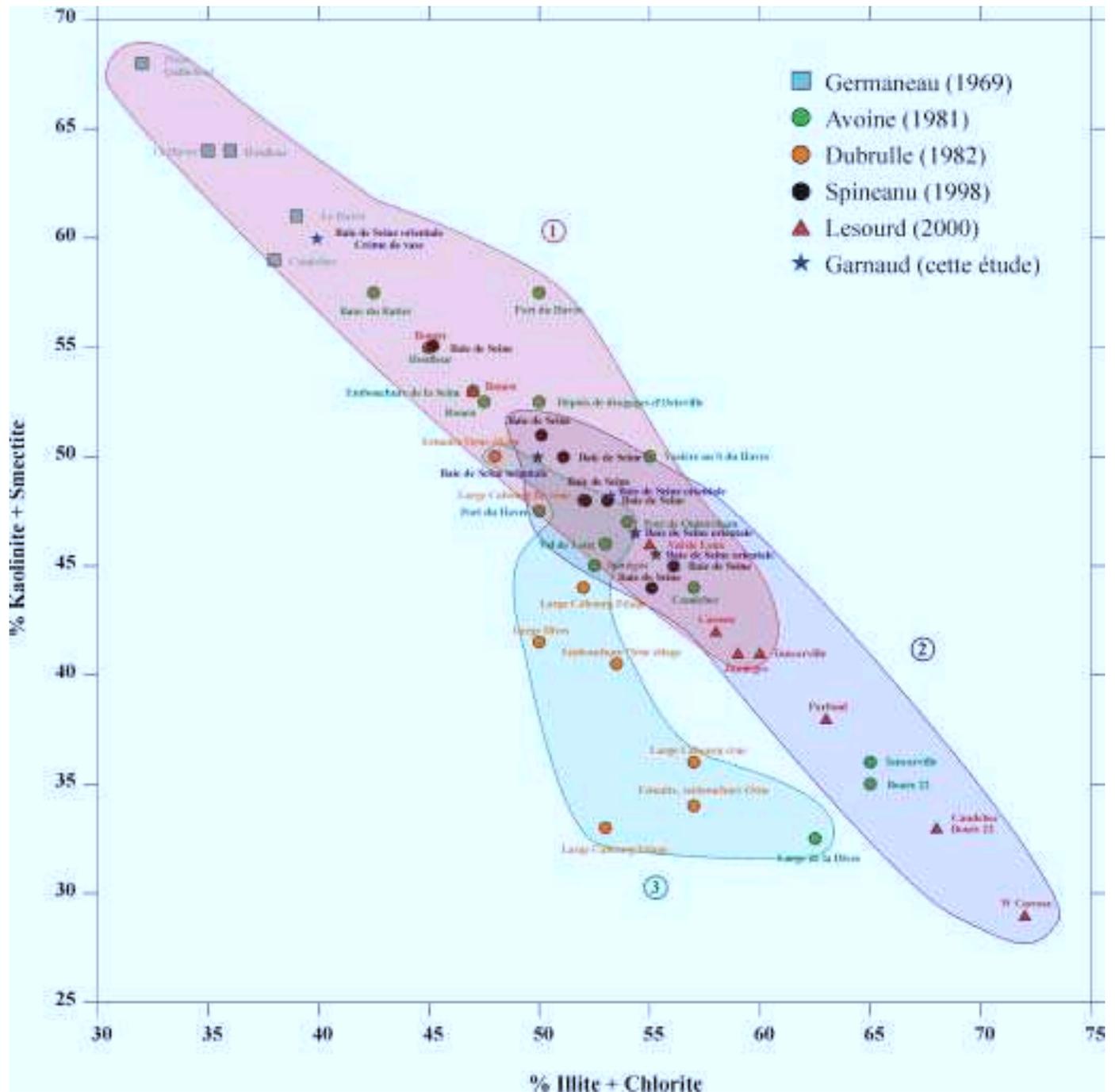
**Tableau III-9.** Composition moyenne des cortèges argileux des sédiments présents dans les fonds subtidiaux de la Baie de Seine sud-orientale.

Les données acquises au cours de mon étude montrent une grande homogénéité dans les cortèges argileux de la Baie de Seine (*tabl. III-9*), en cohérence à ceux proposés par Spineanu (1998). Replacée dans le diagramme kaolinite + smectite =  $f$  (illite + chlorite), l'évolution amont-aval de ces assemblages n'apparaît plus aussi clairement (*fig. III-57*). Les données les plus anciennes (Germaneau, 1968) montrent une grande disparité des teneurs en argiles par rapport aux échantillons prélevés plus récemment au même site (Avoine, 1981; Lesourd, 2000), par exemple à Rouen (*fig. III-57*). Cette divergence peut être imputée aux variations de la couverture sédimentaire et à la différence des techniques analytiques mises en œuvre, celles-ci ayant été améliorées depuis la fin des années 1980 (Holzapffel, 1985; Moore & Reynolds, 1989). Néanmoins, il ressort une distinction possible entre 3 zones (*fig. III-57*):

- ① une zone qui caractérise les sédiments provenant principalement de l'estuaire de la Seine, sans qu'il s'en dégage une zonation amont-aval<sup>10</sup>,
- ② une zone qui caractérise les sédiments de la Baie de Seine mais englobe aussi des sédiments estuariens,
- ③ les sédiments prélevés entre l'Orne et la Dives qui forment une zone minéralogique distincte de ceux de la Baie de Seine et de l'estuaire. Cependant, certains points de cette zone recoupent à la fois les zones ① et ②.

Ce diagramme illustre la complexité d'ensemble du système estuaire-Baie de Seine, avec la difficulté d'utiliser les cortèges argileux afin de préciser l'origine continentale ou marine des sédiments (zone de recoupement entre ① et ②). Le remaniement de la couverture sédimentaire à l'embouchure de la Seine et dans la Baie, ainsi que la récurrence des épisodes de crues engendrent des mélanges, mais aussi des fluctuations importantes des cortèges argileux. Les caractéristiques des vases fraîchement déposées en mars 1999, qui s'apparentent à celles de la zone ① (*fig. III-57*), peuvent donc bien être expliquées par des apports soudains de crue depuis la Seine.

<sup>10</sup> Le point de Caudebec ne fait pas partie de cette province puisqu'il semble être lié à une source particulière locale (Lesourd, 2000).



**Figure III-57.** Relation kaolinite + smectite / illite + chlorite dans les sédiments de Rouen à la Baie de Seine orientale à partir de la compilation des données recueillies dans la bibliographie, complétées de notre étude.

#### 6.2.2.2 Cortège argileux des argiles reliques submergées

Il convient de remarquer que la technique de diffractométrie aux rayons X permettant d'identifier et de quantifier les argiles contenues dans un échantillon a considérablement évolué au cours des 10 dernières années (Moore & Reynolds, 1989). L'utilisation des données anciennes nécessite de connaître la technique de préparation de l'échantillon analysé et la méthode d'interprétation et de quantification des diffractogrammes. En ce qui

concerne les argiles courantes (illite, smectite, kaolinite et chlorite), les résultats réalisés en 1969 ou 2000 sont probablement comparables. Par contre, avec l'apparition de diffractomètres plus précis et de nouveaux traitements appliqués aux échantillons, les diffractogrammes obtenus maintenant montrent assez couramment des associations complexes d'argiles nommées "interstratifiés". Ils résultent d'un assemblage régulier ou non de feuillets de différentes familles de minéraux argileux. Les plus courants sont les interstratifiés illite-smectite ou smectite-chlorite présents en proportions variables. Ces argiles interstratifiées ne sont pas décrites dans les résultats anciens de l'estuaire de la Seine. Les résultats d'analyses de Lesourd (carotte 1664, p. 247, 2000) avaient toutefois montré que certaines carottes prélevées dans l'embouchure de l'estuaire de la Seine présentaient des niveaux d'argiles interstratifiées. Ces argiles ne proviennent pas du bassin versant de la Seine puisque les analyses récentes (Lesourd, 2000) sur les sédiments et les MES de l'estuaire n'ont jamais indiqué leur existence. Une interprétation possible pour leur existence serait la contribution de l'érosion des argiles reliques sous-marines dans lesquelles les minéraux interstratifiés sont bien représentés.

J'ai réalisé sur les sédiments superficiels de la radiale atelier FL01-FL20 une série de 17 analyses des cortèges argileux. Depuis la côte jusqu'à -10 m CM, elles ont révélé une grande homogénéité du cortège des argiles des sables envasés actuels. Un résultat est aussi la présence très significative d'interstratifiés dans ces sédiments superficiels de type 10-14 (illite-smectite). Avec pour but d'utiliser ce type d'argile comme marqueur des sources d'apport dans notre zone d'étude, les sédiments fossiles subtidaux soumis à l'érosion (*cf. chapitre III*) ont également fait l'objet d'une caractérisation du cortège argileux<sup>11</sup>. Le cortège typique comporte en moyenne 45% d'illite, 22% de kaolinite, 20% de smectite et 12% de chlorite ainsi que des argiles interstratifiées. Toutefois, sur la côte du Calvados, les argiles callovo-oxfordiennes des falaises des Vaches Noires (*fig. III-57*) sont aussi marquées par le même type d'interstratifiés (Dugué, 1989, 1991) et peuvent donc, tout comme les argiles reliques subtidales, être la source des argiles rencontrées dans les sédiments superficiels prélevés le long de la radiale atelier.

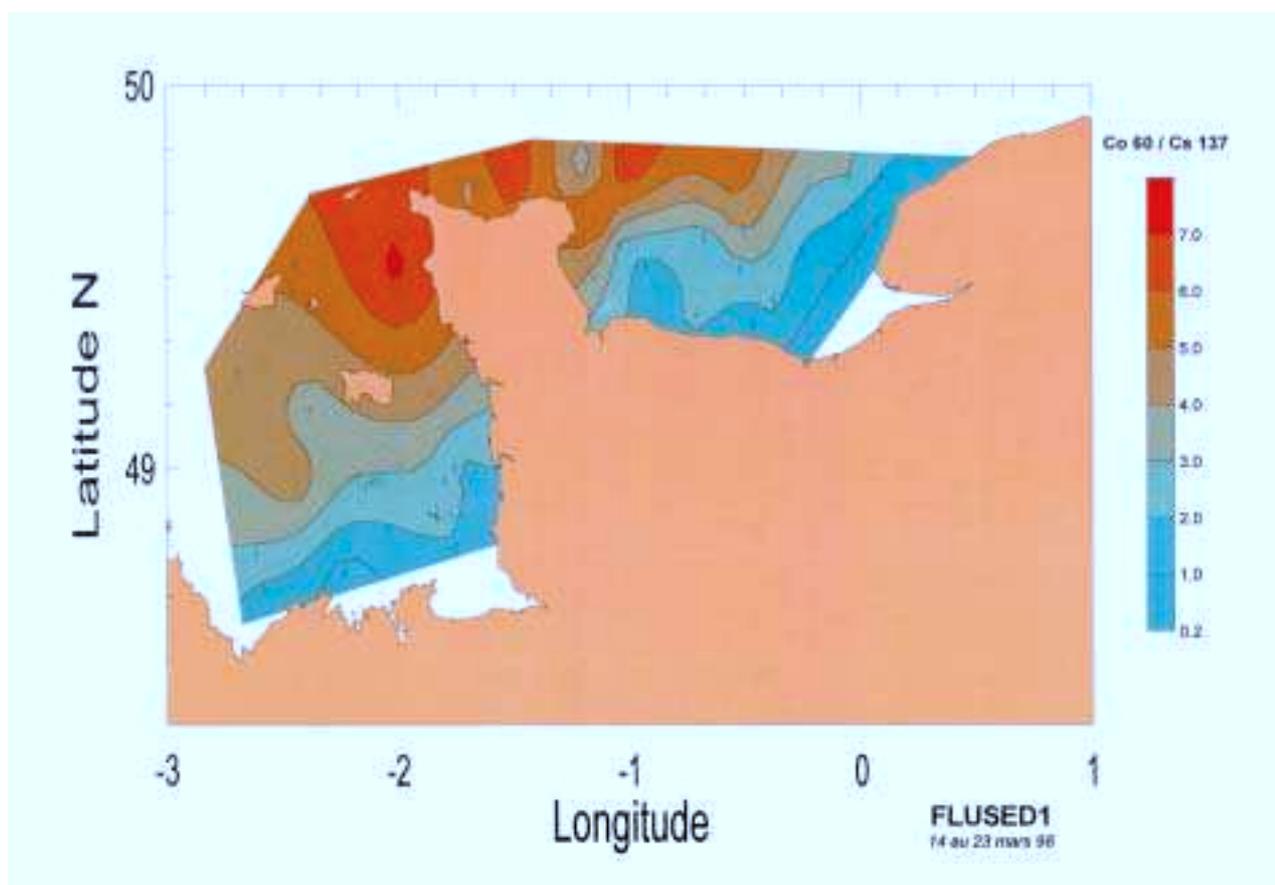
En résumé, les argiles interstratifiées peuvent donc être utilisées comme un marqueur minéralogique de la participation des argiles fossiles subtidales et des marnes jurassiques des falaises littorales à l'envasement à moyen-terme (au pas de temps pluri-annuel) des fonds marins de la Baie de Seine sud-orientale. Aucune quantification ne peut bien évidemment être apportée à cette contribution.

---

<sup>11</sup> Cette étude est présentée de manière plus détaillée dans le chapitre suivant.

### 6.2.2.3 Radionucléides artificiels $^{60}\text{Co}$ et $^{137}\text{Cs}$ : indicateurs des apports marins en Baie de Seine

Les radionucléides artificiels provenant de l'utilisation civile et militaire de l'énergie nucléaire sont étudiés ici en tant que marqueurs des stocks sédimentaires. Les apports particuliers en provenance de la Manche et entrant en Baie de Seine centrale, orientale et dans l'estuaire de la Seine, peuvent être caractérisés par leur rapport  $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$  (Spineanu, 1998; Boust, 1999; Guézennec *et al.*, 1999; Boust *et al.*, 2002). Ces deux radionucléides sont rejetés par l'usine de retraitement des combustibles irradiés de La Hague. Les concentrations respectives de ces deux radionucléides offrent une possibilité d'étude de la pénétration des particules marines en Baie et en estuaire de Seine. Le fait d'utiliser le rapport  $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$  permet de s'affranchir des variations des teneurs seulement liées à la granulométrie et surtout à l'abondance de la fraction fine des sédiments. Des études antérieures ont montré que le rapport des radionucléides artificiels  $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$  décroît depuis la source de contamination (La Hague) vers le golfe normand-breton et la Baie de Seine (*fig. III-58*).



**Figure III-58.** Variations spatiales du rapport  $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$  en Baie de Seine et dans le Golfe normand-breton (Boust, par courtoisie).

Des mesures de ce rapport ont été effectuées à l'IRSN de Cherbourg (D. Boust) sur des échantillons de sédiments superficiels collectés par benne lors de la campagne VASTEDEBA I en Baie de Seine sud-orientale. Les données issues de la campagne SEDIBAIE 1994 (bennes Shipeck) sont intégrées aux résultats (*fig. III-59*). Il est nécessaire de ramener les rapports à une même date de référence, arbitrairement choisie au 01/01/2000, pour s'affranchir des décroissances respectives des deux radionucléides entre les campagnes de 1994 et 2000.

L'évolution des rapports  $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$  dans la zone d'étude est conforme aux observations faites à l'échelle de la Baie de Seine, avec une diminution du rapport d'ouest en est, de Ouistreham vers l'estuaire de la Seine (*fig. III-59*). Ce rapport peut finalement donner une information sur l'âge des particules marines ayant transité en Manche Centrale. Des "anomalies" en plusieurs points au large de Villers-sur-mer avec des valeurs du rapport  $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$  plus faibles, analogues à celles mesurées dans l'embouchure, sont notées. Plusieurs explications sont possibles: (1) ce site est directement sous l'influence des apports particuliers de la Seine et/ou (2) un mélange avec une autre source non marquée par le  $^{60}\text{Co}$  (érosion littorale, érosion des argiles reliques) qui diminue ainsi le rapport initial (facteur de dilution). A ce stade de nos investigations, les deux hypothèses avancées sont possibles.

### 6.2.3 Synthèse : les sources de matériel fin en Baie de Seine orientale

La diversité des sources d'apport en particules fines dans l'ensemble de la Baie de Seine rend difficile la quantification de chaque contribution. De plus, ces nombreuses sources alimentent le système au cours de périodes discontinues plus ou moins longues et avec des charges particulières très différentes. Ainsi, l'envasement à court terme (de quelques semaines à la saison) et à moyen terme (de plusieurs années à la décennie) procède selon des sources distinctes. En effet, les apports qui dominent en Baie de Seine orientale à l'échelle de temps saisonnière ont comme source essentielle les MES expulsées par la Seine lors des crues hivernales; les conditions favorisant l'apport rapide de sédiments fins dans ce secteur seront traitées dans le paragraphe suivant. L'origine des sédiments fins qui participent à l'envasement à plus long terme est plus complexe, plusieurs sources additionnelles se combinant aux apports de la Seine (*fig. III-60*):

- 1) les apports fluviaux issus des trois exutoires du Calvados (Orne, Dives et Touques. Le suivi des sédiments de l'embouchure de l'Orne a montré un dépôt saisonnier de sédiments fins dans l'estuaire et à l'embouchure pendant les crues hivernales (Dubrulle, 1982; Dubrulle & Larssonneur, 1984). Si les apports fluviaux de la Dives et de la Touques se limitent aux principaux chenaux de navigation, les apports de l'Orne expulsés sur une aire limitée de l'embouchure sont ensuite lessivés,

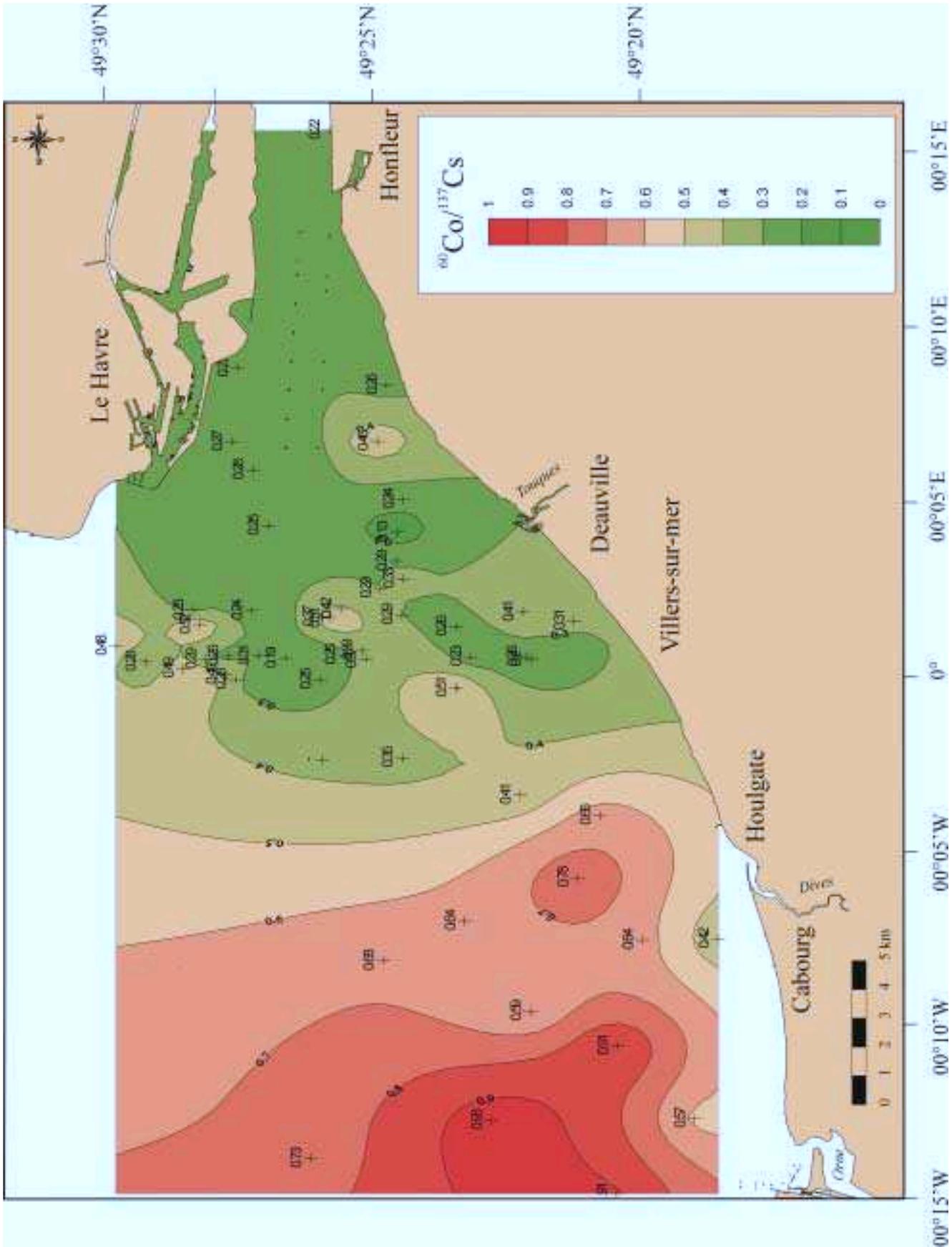


Figure III-59. Répartition spatiale du rapport  $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$  dans les sédiments superficiels en Baie de Seine sud-orientale (missions SedBaie 1994 et VASTEDEBA 2000).

- 2) l'érosion des argiles reliques dans les fonds subtidaux,
- 3) l'érosion des falaises jurassiques, soumises à des coulées boueuses et à des glissements de terrains,
- 4) le matériel particulaire transporté en suspension ou par charriage, lorsque celui-ci a adhéré aux sables (Spineanu, 1998), par les courants de marée pénétrant de la Manche vers la Baie de Seine sud-orientale, et mis en évidence par le marquage en  $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$  des sédiments fins,
- 5) les vases des dépôts de dragages. Les deux plus grands dépôts régionaux (Le Havre, Rouen) se situent au nord de notre zone d'étude et le matériel est redistribué par les courants de marée vers le nord. Toutefois, le dépôt de dragage de Ouistreham situé à 5 miles en mer de la côte affecte la couverture sédimentaire vers notre secteur d'étude.
- 6) la contribution organique diffuse, liée aux blooms phytoplanctoniques printaniers.

L'utilisation de marqueurs spécifiques comme la présence d'interstratifiés dans le cortège argileux des sédiments fins actuels a permis d'apporter un indice de filiation entre la fraction fine présente dans la couverture sédimentaire et les sédiments argileux reliques subtidaux et les argiles des falaises callovo-oxfordiennes.

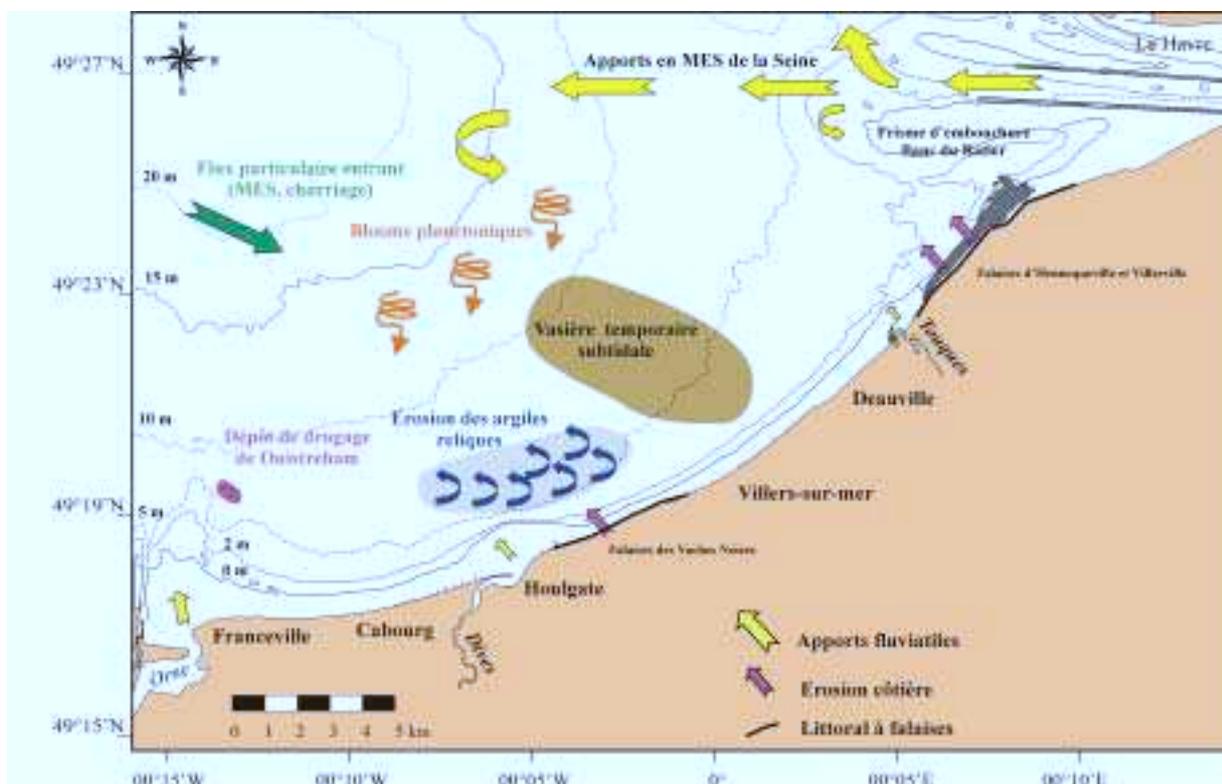


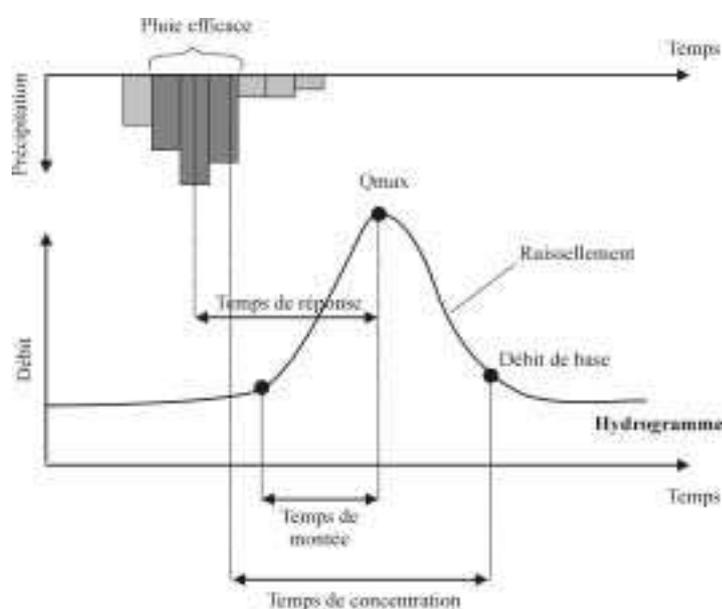
Figure III-60. Bilan des différentes sources de sédiments fins en Baie de Seine sud-orientale.

## 7. Les sédiments fins d'origine fluviale apportés par les crues de la Seine dans le domaine sud-oriental

### 7.1 Introduction

#### 7.1.1 La sédimentation fine identifiée comme le produit des épisodes de crues fluviales sur les plates-formes continentales actuelles

Dans le langage courant, le terme de crue désigne une brusque montée du niveau des eaux d'une rivière ou d'un fleuve causée par de fortes précipitations ou la fonte des neiges. Parmi tous les phénomènes hydrométéorologiques, les grandes crues retiennent tout particulièrement l'attention en raison des modifications spectaculaires qu'elles apportent aux paysages riverains et de leurs effets destructeurs (Sloan *et al.*, 2001; Chamley, 2002). Les hydrologues considèrent le phénomène de crue dès lors qu'un certain niveau statistique de débit fluviale est atteint. De manière générale, on caractérise les crues soit par leur maximum instantané de débit, soit par les hauteurs d'eau atteintes. Cependant, ces paramètres ne suffisent pas à bien décrire les crues: les notions de durée de la crue, de ses principales phases (temps de montée et durée de la décrue) et du volume d'eau écoulé doivent également être prises en compte (*fig. III-61*).



**Figure III-61.** Définition des durées caractéristiques relatives à un hydrogramme de crue (d'après Javelle, 2001). A un instant donné, le débit d'un cours d'eau au point de mesure est fonction de la surface du bassin versant en amont, de la quantité de pluie reçue par ce dernier et du coefficient d'écoulement. Les paramètres permettant de caractériser une crue sont:

- le temps de réponse: intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie efficace et le maximum de l'hydrogramme ( $Q_{max}$ ),
- le temps de montée: il s'agit de la durée écoulée entre le début de l'arrivée à l'exutoire du "ruissellement" et le maximum de l'hydrogramme,
- le temps de concentration (ou durée de ruissellement): temps que va mettre une particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée de l'exutoire pour atteindre le cours d'eau; cette durée est généralement comprise entre la fin de la pluie efficace et la fin du ruissellement.

Les différents systèmes fluviaux peuvent être classés selon la fréquence des épisodes de crue. On oppose ainsi les crues dites saisonnières, associées aux conditions de mousson et aux dépressions hivernales, aux crues extrêmement violentes typiquement imprévisibles. Les crues saisonnières (*seasonal floods*) sont plutôt typiques des fleuves

majeurs (cf. chapitre 1, § 1.3, taille moyenne à grande) comme l'Amazone, le Mississippi ou le fleuve Columbia (Amérique du Nord). Elles s'échelonnent sur plusieurs semaines à plusieurs mois (e.g. Drake, 1976; Drake & Cacchione, 1985; Geyer *et al.*, 1991; Nittrouer & Kravitz, 1996; Coleman *et al.*, 1998; Geyer *et al.*, 2000). Dans le cas des grands systèmes fluviaux mondiaux (Mississippi ou Huanghe), les immenses plaines d'inondation (de crue) et les affluents associés à ces fleuves servent de régulateur lors des phases majeures de crue. A l'inverse, certains plus petits fleuves comme l'Eel river (Amérique du nord) sont caractérisés par des crues de courte durée (quelques jours à quelques semaines) le plus souvent causées par des épisodes pluvieux exceptionnels. Les dépôts de crue engendrés lors de ces conditions inhabituelles ne se limitent plus aux embouchures (e.g. Sternberg, 1981; Allison *et al.*, 2000; Verlaan & Spanhoff, 2000) mais se trouvent dispersés sur le plateau continental côtier. Wheatcroft *et al.* (1996) et Wheatcroft (2000) proposent d'appeler ce type de crue "*oceanic flood*" que l'on traduira en français par "crue océanique". Les crues océaniques sont donc plutôt typiques des fleuves modestes, dont les bassins de drainage sont réduits mais à reliefs prononcés, et apparaissent suite à des épisodes de précipitations extrêmes. Ainsi, le débit moyen annuel enregistré sur l'Eel river varie entre 100 et 350 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (Syvitski & Morehead, 1999) mais en période de crue, les débits instantanées peuvent être multipliés par 100 voire par 200; l'Eel river a atteint par exemple un débit record de 21 300 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> en décembre 1964 (Brown & Ritter, 1971).

#### 7.1.2 Les crues océaniques (*Oceanic flood*)

Le concept de crue océanique est apparu très récemment suite aux études menées sur l'Eel river et a donné lieu à de très nombreuses publications dans des numéros spéciaux de revues scientifiques: (1) *Oceanic Flood Sedimentation* édité par Robert Wheatcroft dans *Continental Shelf Research* (2) *The Formation of Continental-Margin Strata* édité par C.A. Nittrouer dans *Marine Geology* et (3) *Creation and Interpretation of Sedimentary Strata on Continental Margins* édité par C.A. Nittrouer et J.H. Kravitz dans *Oceanography*. En effet, la sédimentation fine liée aux crues océaniques des fleuves "moyens" a longtemps été occultée du fait de l'intérêt porté aux grands systèmes fluviaux comme l'Amazone ou le Mississippi. Pourtant, à l'échelle mondiale, certains chercheurs estiment que les petits fleuves aux bassins versants à relief accentué apportent environ la moitié de la charge annuelle mondiale de MES en mer (Milliman & Syvitski, 1992). Parce que l'évolution des débits de ces petits fleuves est souvent liée à des précipitations importantes (Inman & Jenkins, 1999), la plupart des sédiments qui atteignent l'océan par ces fleuves modestes le sont probablement durant des phases de crues océaniques (Wheatcroft, 2000). Les études récentes menées sur ce type de crue, et en particulier l'étude de leurs conséquences sous la forme de dépôts en domaine de plate-forme interne, ont demandé la mise en place d'une nouvelle stratégie d'échantillonnage et de moyens en mer. En effet, les crues océaniques sont typiquement imprévisibles et en contradiction complète avec la programmation de

missions plusieurs mois à l'avance. De plus, la rapidité d'intervention (*rapid event-response*) sur ce genre de dépôt est primordiale compte tenu de l'altération rapide des dépôts ainsi mis en place (Wheatcroft, 2000). Dans le cas de l'Eel river (*fig. III-62*), les moyens en mer déployés ont été impressionnants: (i) suivi du panache turbide en mer au large de la côte nord de Californie par mesures CTD et en hélicoptère, caméra à plancton, stations multiparamètres autonomes (*tripod*) submersibles (courantomètre, CTD, OBS-concentration en MES), prélèvements d'eau par bouteille Niskin en hélicoptère (Geyer *et al.*, 2000; Hill *et al.*, 2000; Curran *et al.*, 2002), (ii) missions de prélèvements sédimentaires (bennes et carottages, e.g. Goff *et al.*, 2002) et de géophysique (acoustique, Borgeld *et al.*, 1999) réalisées juste après les crues exceptionnelles de 1995 et 1997 (Wheatcroft & Borgeld, 2000) et (iii) analyses radiochimiques des sédiments, e.g.  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ , C/N (Leithold & Hope, 1999; Sommerfield & Nittrouer, 1999; Sommerfield *et al.*, 1999). Une présentation synthétique des principaux résultats obtenus en terme de sédimentologie sur les dépôts de crue mis en place après les crues exceptionnelles de l'Eel river est proposée en annexe 4 de ce manuscrit.



**Figure III-62.** Photographie aérienne de l'embouchure de l'Eel river (Californie du nord) en période de crue "mineure" avec la dispersion de son panache turbide en mer ([www.oce.orst.edu](http://www.oce.orst.edu)).

La courte durée et les apports importants issus de ces crues océaniques ont des implications essentielles. En effet, durant les crues océaniques, une grande quantité de sédiments fins est rapidement apportée à la mer sur la plate-forme continentale. Sur les marges actives comme celles du Nord-Ouest américain et du Sud de l'Europe, un grand nombre de fleuves pourrait développer des crues dites océaniques (Wheatcroft, 2000) et une part importante des sédiments fins accumulés sur les plateaux continentaux seraient finalement apportés lors de tels événements. La sédimentation fine en résultant pourrait devenir encore plus commune dans le futur pour au moins deux raisons. D'abord, l'augmentation des surfaces continentales exploitées et les déboisements accrus ont entraîné une érosion accélérée des terres tendant à l'augmentation de la production de sédiments dans beaucoup de régions du monde. Ensuite, l'intensité des pluies augmente significativement dans certaines régions du monde comme en Amérique du Nord (Knox, 2000) ou en Europe (Rîmbu *et al.*, 2002). Depuis 90 ans par exemple, l'enregistrement des débits de l'Eel river illustre cette tendance générale: les 6 à 7 crues majeures au débit fluvial supérieur à  $8 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ont eu lieu après 1950 (Wheatcroft, 2000; Sommerfield *et al.*, 2002).

## 7.2 Distribution de sédiments fins issus des apports de crue en Baie de Seine

### 7.2.1 Historique des crues de Seine

Les recueils de témoignages laissés au travers de documents divers<sup>12</sup> permettent de souligner quelques grands épisodes de crues de la Seine au cours du dernier millénaire. Ainsi, parmi les plus grandes inondations documentées du Bassin Parisien du début du dernier millénaire, on note celles de 1196, 1120, 1235, 1281, 1296<sup>13</sup>. La crue la plus importante fut probablement celle de 1196 qui dura 16 jours et où l'eau monta à Paris jusqu'aux stalles qui ornaient le pourtour extérieur de Notre Dame.

La période médiévale comporte également de nombreux événements de crues exceptionnelles de la Seine. En effet, cette époque correspond à un épisode climatique récent au cours duquel un refroidissement, appelé Petit Age Glaciaire (PAG), a été observé dans de nombreuses régions du monde (Lamb, 1979; Briffa *et al.*, 1990; Blackford & Chambers, 1995). Ainsi, lors de période la plus froide du PAG, compris entre 1550 et 1700-1800 (Le Roy Ladurie, 1983; Grove, 1988, 2001), les épisodes neigeux importants qui se mêlaient aux fortes précipitations ont engendré des crues de grande ampleur. La plus grande crue connue serait celle de 1658 lors de laquelle la cote de l'eau à Rouen a atteint 12 mètres. En 1882, une crue exceptionnelle a également atteint un débit record de  $2480 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Le Floch, 1961).

Depuis le début des années 1900, c'est la crue centennale de 1910 qui reste dans les mémoires. Elle a été engendrée par une succession d'épisodes pluvieux et pluvio-neigeux (du 15 au 26 janvier et du 5 au 10 février). Elle fut la plus importante du siècle dernier pour l'ensemble du Bassin Parisien. La cote de l'eau à Rouen a dépassé 9 mètres, cote qui sert depuis de niveau d'alerte de crue. Depuis 1941, les intensités des crues de la Seine sont connues grâce aux mesures journalières de débit réalisées au barrage de Poses (160 km de l'embouchure) par le Service de la Navigation de la Seine (SNS, rattaché au Port Autonome de Rouen). Le débit moyen annuel mesuré à Poses est de  $436 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  avec des moyennes annuelles entre 195 et  $902 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Les débits instantanés en étiage varient peu grâce aux différents barrages réalisés le long de la Seine permettant d'avoir un débit régulier, avec un minimum de  $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à Paris en été. Les fluctuations du débit sont liées aux épisodes de pluies saisonnières, à périodicité hivernale, ponctuées d'épisodes de type événementiel. Pour caractériser ces crues exceptionnelles, la notion de temps de retour d'une crue doit être introduite et correspond à une fonction statistique qui permet de mesurer sa fréquence d'occurrence. Dans le cas de la Seine, le débit de crue instantané de fréquence de récurrence

---

<sup>12</sup> Par exemple dans les registres officiels, les délibérations municipales ou les comptes ecclésiastiques qui rendent compte des conséquences de conditions météorologiques extrêmes: mortalités élevées, épidémies, altérations de la production agricole - famines,...

<sup>13</sup> D'après "Les inondations de Paris à travers les âges", Cité et Marais, MDCCCX, sur le site Internet: <http://www.philippe-auguste.com/quotidien/inondations.html>.

de 10 ans (QIX 10) a été calculée à  $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (DIREN Haute-Normandie, au 07/06/2000). Une crue de temps de retour de 10 ans se produit en moyenne 10 fois par siècle, mais peut très bien avoir lieu deux années de suite, ou ne pas se produire pendant plus de 20 ans. En fait, lors des 4 dernières années (1999-2002), la Seine a connu quatre crues décadales ( $> 2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) successives avec des débits instantanés dépassant les  $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 7.2.2 Evolution des crues de la Seine depuis 1941

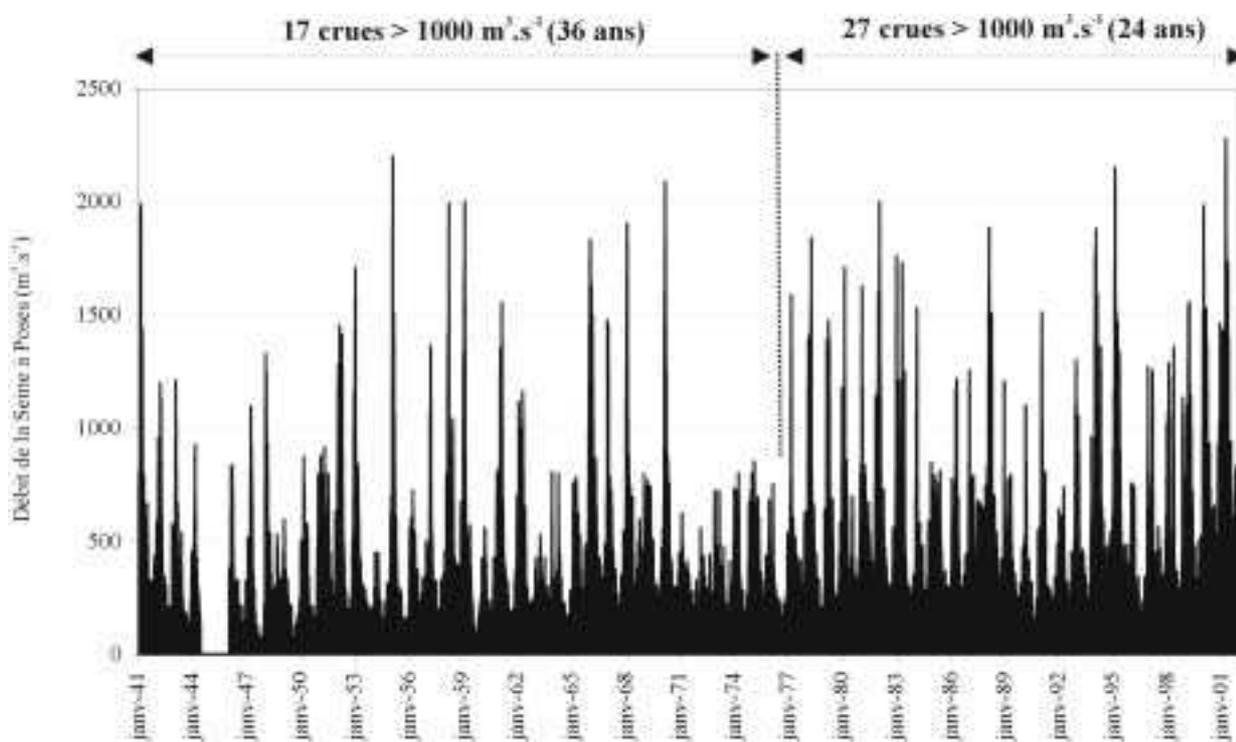
Depuis 1941, on dispose d'un enregistrement complet des caractéristiques hydrologiques de la Seine. Face aux besoins de plus en plus importants en eau de la population, de nombreux barrages réservoirs<sup>14</sup> ont été réalisés le long du cours de la Seine pour renforcer ses débits d'étiage ainsi que pour limiter les montées d'eau lors des crues de faible amplitude, notamment dans la région parisienne. Toutefois, lorsque les montées d'eau venues des différents affluents de la Seine sont synchrones et que les volumes parviennent simultanément à la Seine, les crues hivernales ne peuvent être stoppées malgré l'implantation des barrages. Ainsi, en dépit de ces aménagements, depuis 1977, 27 crues ont été enregistrées avec un débit qui dépasse le seuil des  $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Pendant la période 1941-1976 (soit 36 ans), seulement 17 crues supérieures à ce débit se sont produites. La crue de 1955 fut très importante et atteignit quasiment celle de 1910 avec un débit de  $2150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (23 janvier 1955); le débit a même excédé  $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pendant une semaine. Les autres inondations majeures furent celles de 1958, 1959 et 1983. Depuis 1977, les épisodes de crue de la Seine sont 2 ½ fois plus fréquents qu'au cours de la période précédente, de 1941 à 1977 (*fig. III-63*). Il faut rappeler que les apports de sédiments fins à l'embouchure de la Seine et à la mer se produisent actuellement principalement au cours de ces périodes de crue (*cf. chapitre I*).

Une publication récente de Sommerfield *et al.* (2002) relie l'augmentation de la sédimentation fine (préservation des dépôts de crue) sur le plateau continental adjacent à l'Eel river à l'augmentation des épisodes de crues en rapport direct avec les récents changements climatiques sur la côte Nord Californienne depuis 1950 (Knox, 2000; Malamud & Turcotte, 2003). En Europe, les variations décadales (1931-1995) du débit fluvial du Danube ont également été mises en parallèle avec les changements climatiques dus à l'oscillation Nord-Atlantique (Rîmbu *et al.*, 2002). A la différence de l'estuaire de la Seine, l'Eel n'étant pas aménagée, il est possible de rapprocher directement l'augmentation des dépôts de sédiments fins aux changements climatiques intervenus à partir du milieu du

---

<sup>14</sup> Une étude sur l'ensemble des barrages sur les rivières du bassin de la Seine et les cours d'eau côtiers normands dénombre 8000 barrages de petite taille mais seuls 5% des barrages sont encore utilisés aujourd'hui (lu dans La Lettre de Sea-River - Semaine du 5 au 11 novembre 2001-N° 28). Vingt six grands barrages servent à réguler les débits de la Seine, de la Marne, de l'Aube et de l'Yonne, mais en revanche, ils n'ont qu'un rôle très limité sur l'écoulement lié aux grandes crues.

XX<sup>ème</sup> siècle. Dans le cas de l'estuaire de la Seine, le signal climatique direct a pu être occulté par l'évolution géomorphologique de l'estuaire. Depuis 1977 environ, il apparaît pourtant une augmentation de la fréquence des crues (*fig. III-63*), sans qu'il puisse être possible de quantifier l'impact des changements climatiques récents sur l'évolution des fonds de la Baie de Seine sud-orientale.



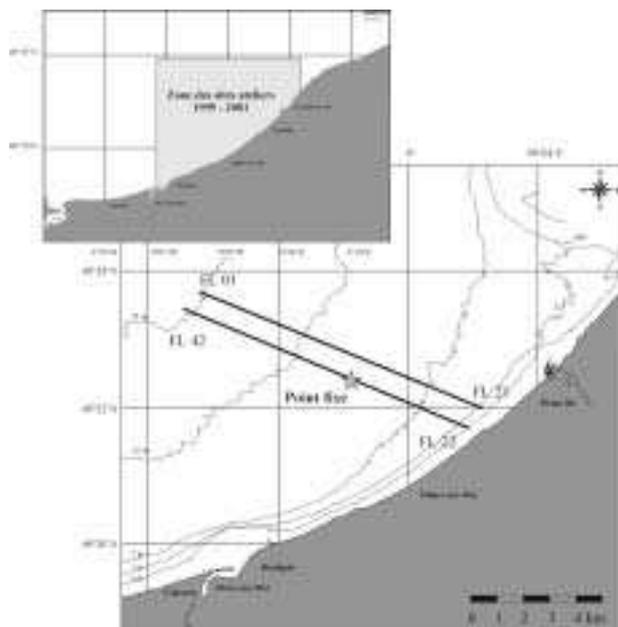
**Figure III-63.** Historique des débits de la Seine mesurés à Poses entre 1941 et 2001. Source des données: cellule anti-pollution du port de Rouen.

### 7.3 Campagnes de mesures hydrosédimentaires en point fixe au large de Villers-sur-Mer

Afin d'appréhender les rôles respectifs du débit de la Seine (phases de crue) et de la marée, dans la dynamique des sédiments fins en Baie de Seine orientale (dépôt et remise en suspension), nous avons effectué des mesures hydrosédimentaires en un point fixe de notre secteur d'étude.

Un suivi des caractéristiques de la masse d'eau a été réalisé au cours de mouillages, pendant un cycle de marée semi-diurne (13h) sur une station de référence située à mi-distance de la radiale atelier FL22-FL43 (*fig. III-64*). A noter que la bonne réalisation des enregistrements a nécessité des conditions modérées d'agitation de la mer. Ces mesures ont été effectuées six fois entre 1998 et 2000 en combinant différents débits de la Seine et

différents coefficients de marée. Pour cela, une sonde multi-paramètres (sonde CTD Seabird équipée d'un turbidimètre OBS) et un courantomètre ADP<sup>15</sup> Sontek ont permis de mesurer: profondeur, température, salinité, concentration en matières en suspension (MES), vitesse et direction des courants. Lors du point fixe du 21 mars 2000, un microgranulomètre Laser (LS 230 Coulter) embarqué à bord du "Côtes de la Manche" a permis de mesurer la taille des particules contenues dans les prélèvements d'eau réalisés toutes les 15 minutes à 3 profondeurs différentes: surface, mi-profondeur et fond.



**Figure III-64.** Position du site choisi pour les mesures hydrosédimentaires en Baie de Seine sud-orientale. Coordonnées du point: 49°21,68'N et 00°01,98'W, profondeur -6 m CM.

### 7.3.1 Mesures en conditions d'étiage de la Seine

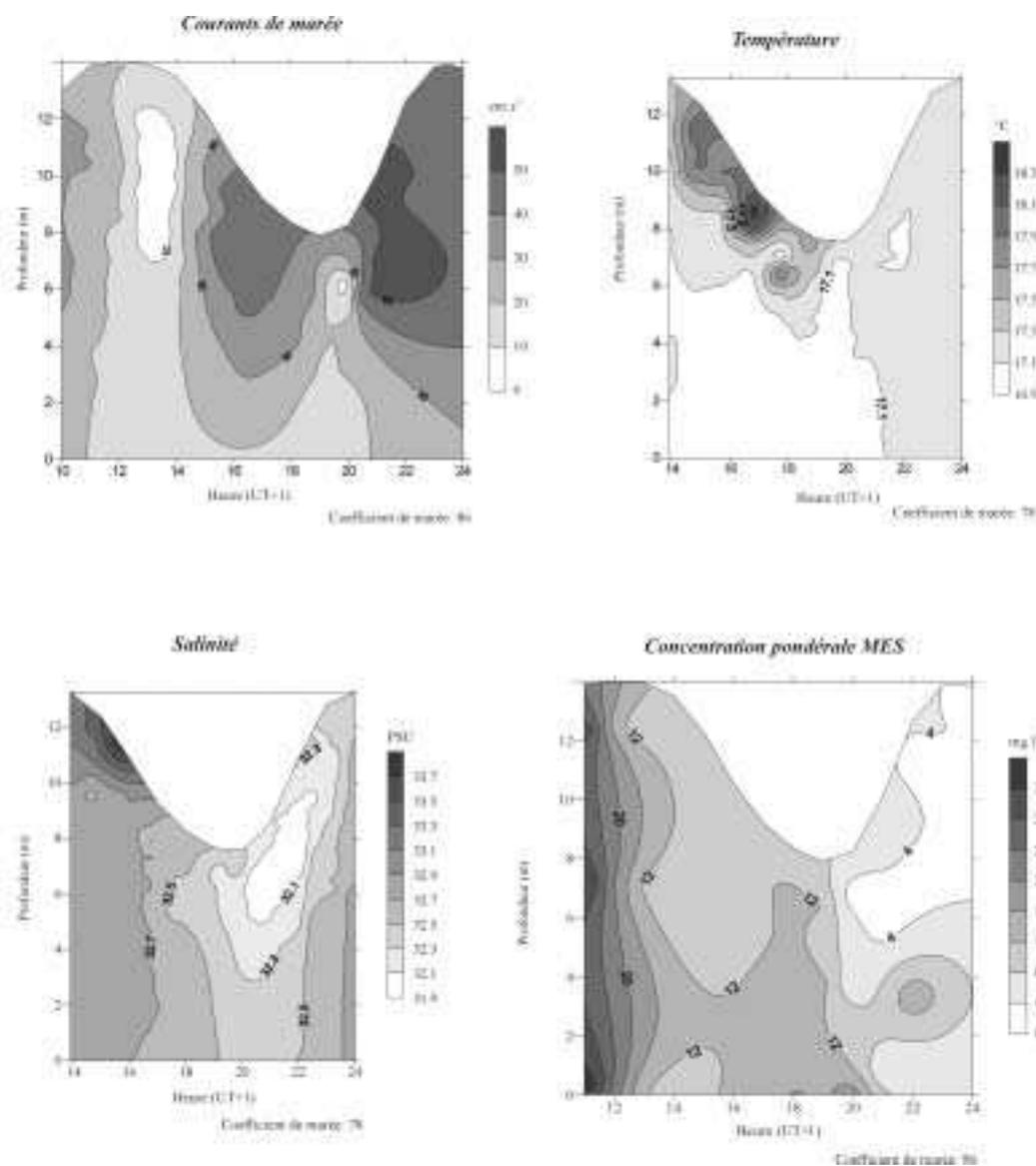
#### 7.3.1.1 Période de moyennes vive-eaux

Le point fixe a été réalisé lors de la mission de BENTHOSEINE 1998 entre le 23 et 24 septembre 1998 par un coefficient de marée de 78-86 et un débit de la Seine à Poses de l'ordre de  $220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (fig. III-65). Suite à un mauvais fonctionnement de la sonde CTD, les mesures de courant et de concentration pondérale de MES (mesures de filtration) se sont déroulées le 23 septembre tandis que les données de salinité et température ont dûes être acquises le lendemain. Les teneurs en MES sont à utiliser avec précaution puisqu'elles sont issues des filtrations sur des échantillons d'eau prélevés seulement toutes les deux heures en surface, mi-fond et profondeur, contre toutes les 15 minutes et sur toute la tranche d'eau avec la CTD.

Dans ces conditions hydrologiques, les courants de marée atteignent au maximum  $50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  au cours du flot, avec des valeurs plus importantes en surface qu'au fond (fig. III-65). La température et la salinité sont homogènes au cours du cycle de marée. C'est au moment de la basse mer et au début du montant (20-21 h) que la salinité atteint les plus faibles valeurs enregistrées au cours de ce cycle de marée dans l'ensemble de la tranche

<sup>15</sup> Au cours de la mission BENTHOSEINE 98, les mesures de courant ont été réalisées à partir d'un courantomètre électro-magnétique S4 permettant seulement de mesurer la vitesse des courants.

d'eau, en étant plus marquée en surface (*fig. III-65*). Cette variation atteint 1,8 PSU et correspond probablement à l'influence modeste des eaux douces expulsées en cette fin d'été et au début du flot de l'embouchure de Seine; elles sont ainsi identifiées sur le secteur d'étude. Aucun gradient vertical de salinité et de température n'est remarqué dans ces conditions hydrologiques. Il n'existe pas, non plus, de gradient vertical des concentrations en MES lors de ce cycle de marée (*fig. III-65*), les données ne permettant pas de mettre en évidence une décantation des fractions fines au moment des étales, ni une remise en suspension des MES au moment du flot. Les valeurs en MES peuvent toutefois atteindre des valeurs de l'ordre de  $30 \text{ mg.l}^{-1}$  au voisinage de la première étale de pleine mer, sur l'ensemble de la tranche d'eau. L'absence de gradient au moment des mesures est probablement lié aux conditions météorologiques médiocres responsables du brassage qui favorisaient les remises en suspension.



**Figure III-65.** Evolution des paramètres hydrosédimentaires au cours du point fixe de 23 septembre 1998 (courants de marée et concentrations pondérales en MES) et du 24 septembre 1998 (température et salinité) au large de Villers-sur-mer (d'après Juhe, 1999). Les profondeurs sont données en prenant le fond comme référence. Conditions météorologiques des vents: direction maximale moyenne (N100°); force maximale:  $9 \text{ m.s}^{-1}$ ; force moyenne:  $4,8 \text{ m.s}^{-1}$ . Débit de la Seine:  $224 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  – Etiage.

### 7.3.1.2 Période de grandes vives-eaux

Les mesures au point fixe se sont déroulées le 18 mai 1999 (campagne BENTHOSEINE 99) dans des conditions de débits moyens de la Seine de  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et avec un coefficient de marée de 103/98.

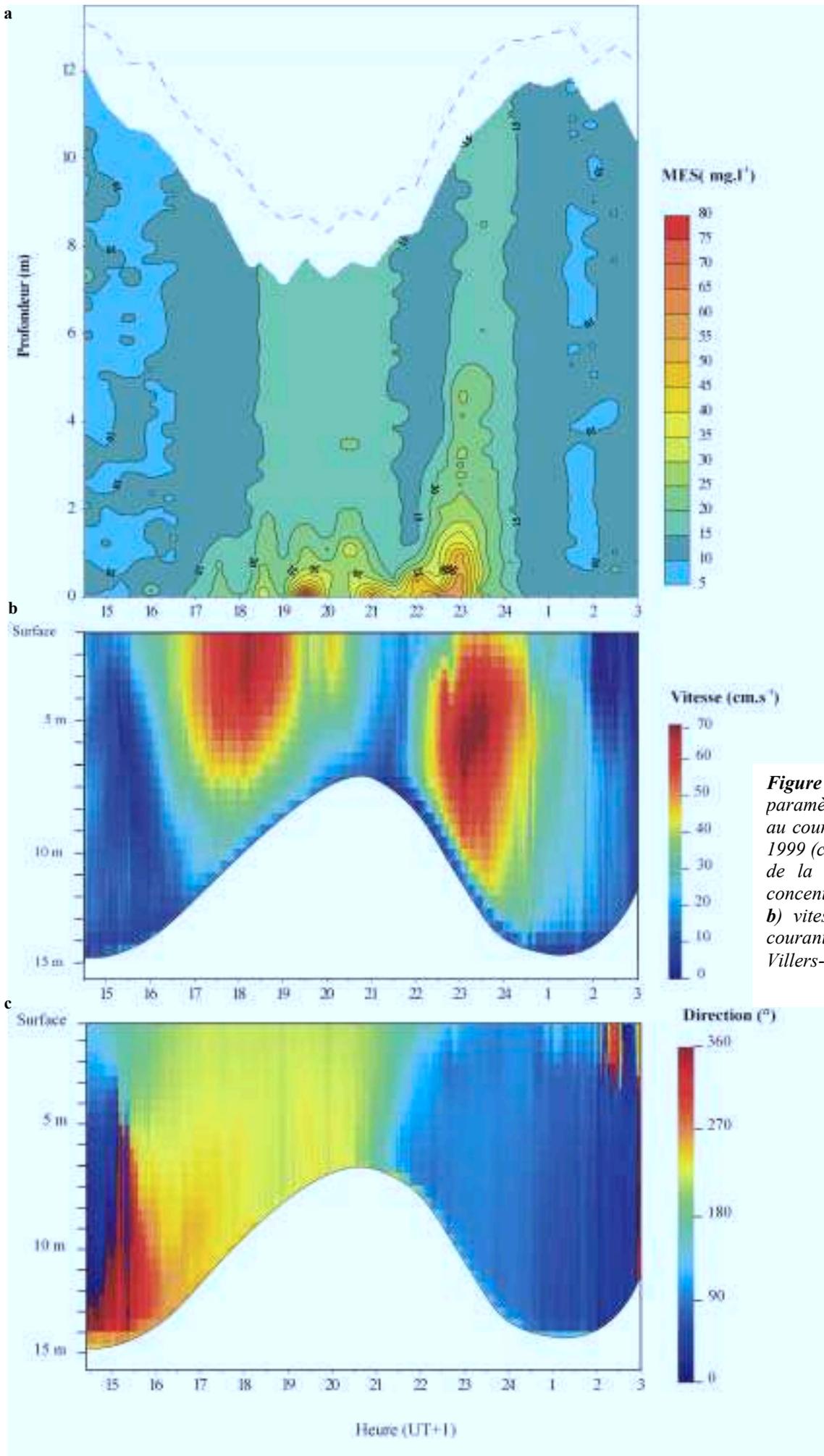
Compte tenu des conditions de marée, les vitesses des courants atteignent des valeurs relativement élevées ( $> 50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) en fin de jusant et au début du flot, avec la renverse très nette des directions au moment du flot (*fig. III-66c*). Les données de salinité et de température ne sont pas présentées suite à un dysfonctionnement de la CTD; seules les données de concentration pondérale en MES sont discutées. Les valeurs de MES sont relativement homogènes au cours du cycle de marée à l'exception du fond où des valeurs de  $70\text{-}80 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  sont enregistrées sur les 2 premiers mètres au moment de la fin du jusant et au début du flot. Au cours de la phase de montée du flot (21 h 30 à 23 h 30, *fig. III-66a et b*), les concentrations de MES sont de plus en plus importantes et affectent jusqu'aux cinq premiers mètres à partir du fond ( $\sim 20 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  de 23 h à 23 h 30, *fig. III-66a*), avec l'augmentation croissante des vitesses des courants (*fig. III-66b*). On remarque également que l'ensemble de la colonne d'eau est affectée par une turbidité plus élevée entre 18 h et 21 h 30 (*fig. III-66a*).

## 7.3.2 Mesures en conditions de crue de la Seine

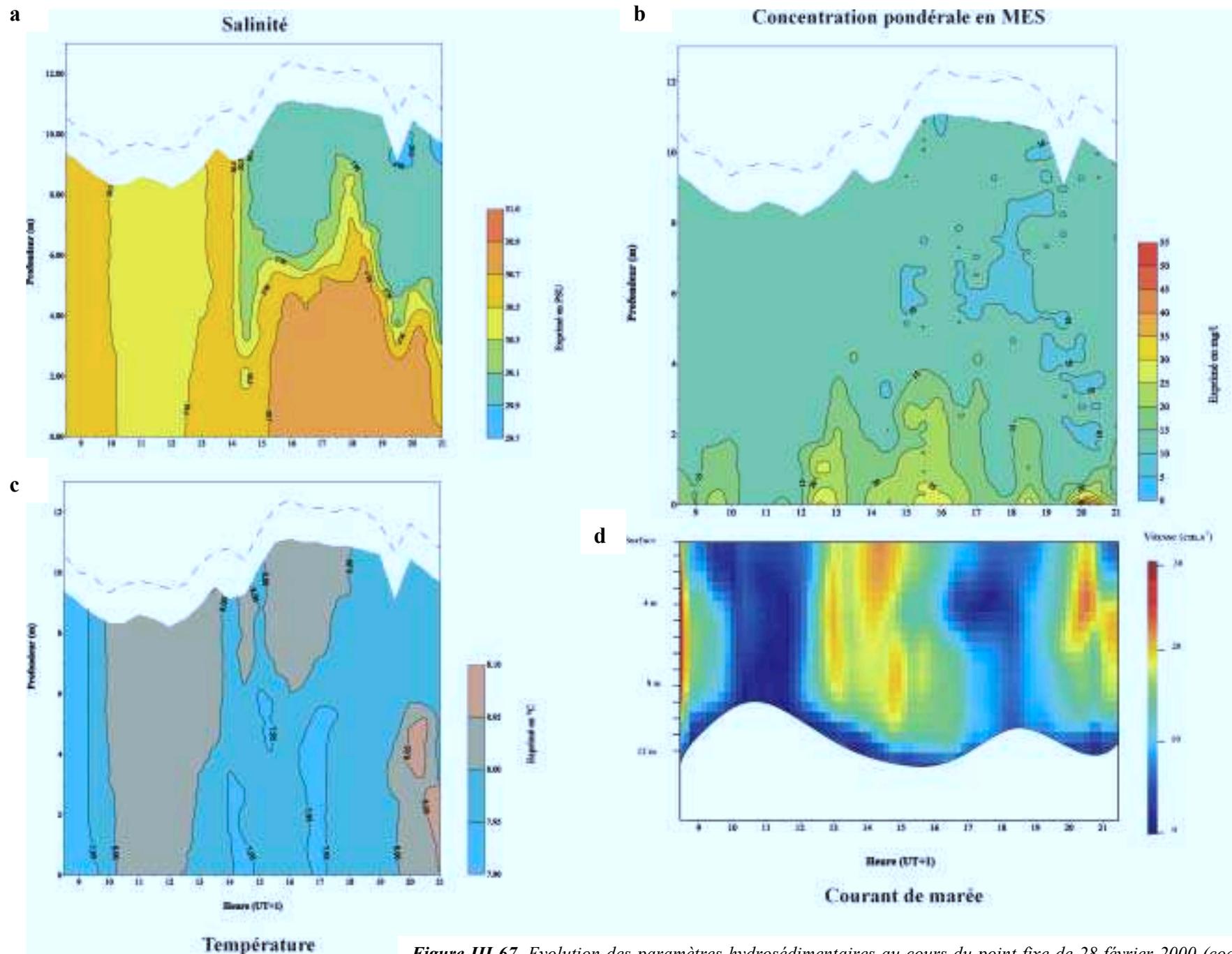
### 7.3.2.1 Période de mortes-eaux

Les mesures ont été effectuées le 28 février 2000 lors d'une crue de la Seine ( $\sim 1250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  enregistré à Poses le jour des mesures) et en mortes-eaux (35-31). Les débits avaient été élevés durant les 5 semaines précédant les mesures.

Il n'existe pas de gradient de température ni de salinité dans ces conditions (*fig. III-67a, c*); les variations observées au cours du cycle de marée sont très faibles:  $0,2^\circ\text{C}$  pour la température (max.:  $8,1$ ; min.:  $7,9^\circ\text{C}$ ) et  $1,3$  PSU pour la salinité (max.:  $31$ ; min.:  $29,7$  PSU). Les vitesses des courants de marée mesurées correspondent à des conditions de mortes-eaux (SHOM, 1968) avec un maximum de  $30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  atteint au moment du flot (*fig. III-67d*). Les concentrations en MES montrent seulement des variations sur les quatre premiers mètres; les valeurs y sont en moyenne de l'ordre de  $15\text{-}30 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  mais peuvent ponctuellement atteindre  $50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  au fond (*fig. III-67b*). On rencontre cette couche turbide de fond pratiquement pendant tout le cycle de marée.



**Figure III-66.** Evolution des paramètres hydrosédimentaires au cours du point fixe de 18 mai 1999 (coefficient de 103/98, débit de la Seine de 450 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). **a)** concentration pondérale en MES, **b)** vitesses et **c)** directions des courants de marée; au large de Villers-sur-Mer.



**Figure III-67.** Evolution des paramètres hydrosédimentaires au cours du point fixe de 28 février 2000 (coefficient de 35-31, débit de la Seine de  $1248 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). **a)** salinité, **b)** concentration pondérale en MES, **c)** température et **d)** vitesses des courants de marée.

### 7.3.2.2 Période de moyennes vives-eaux

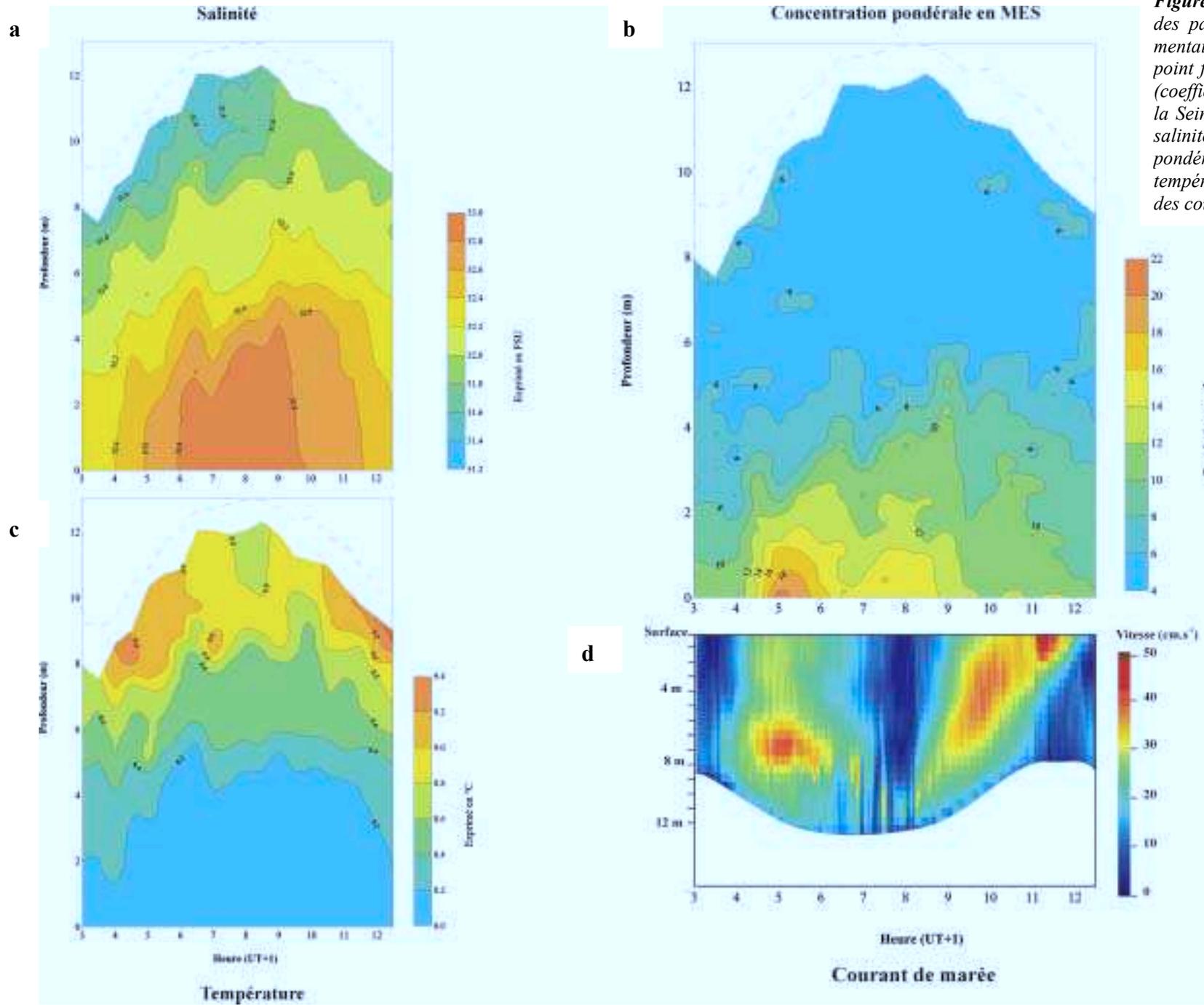
Les mesures ont été réalisées le 14 mars 1999: coefficient de 58 et débit de la Seine de  $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

De très nets gradients verticaux pour les trois paramètres considérés sont enregistrés (*fig. III-68*). L'évolution des températures (*fig. III-68c*) au cours du cycle est caractérisée par l'arrivée d'eau plus chaude dans les deux premiers mètres de surface ( $\sim + 1^\circ\text{C}$ ) au moment du flot (5 h) et du jusant (11 h). Cette eau est également légèrement dessalée, inférieure à 31 PSU, par rapport à l'ensemble de la tranche d'eau (*fig. III-68a*). Les concentrations en MES généralement faibles sont maximales dans les 4 premiers mètres du fond tout au long du cycle de marée. Ainsi, au début du flot (12 h et 19 h 30, *fig. III-68b*), les teneurs en MES atteignent au maximum  $20 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  mais restent toujours plus élevées que celles de surface pendant la quasi-totalité du cycle de marée (*fig. III-68b*). Au jusant, les concentrations en MES deviennent moins fortes sur le fond mais le gradient perdure néanmoins.

### 7.3.2.3 Période de grandes vives-eaux

Le point fixe réalisé le 21 mars 2000 s'est déroulé par un coefficient de marée de 107 et en pleine période de crue de la Seine avec un débit de  $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (*fig. III-69*).

Un problème technique nous a empêché d'acquérir les données de la sonde CTD pendant 3 heures à la basse mer. Les vitesses de courants sont, avec celles de la vive-eau du 18 mai 1999, les plus fortes enregistrées lors de nos mesures (*fig. III-69d*). Elles atteignent des valeurs supérieures à  $50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  sur presque toute la tranche d'eau. Les profils des vitesses des courants de marée sont identiques à ceux réalisés le 18 mai 1999, avec des minima de vitesse au fond liés aux frottements. C'est dans ces conditions qu'apparaît très clairement l'arrivée d'eau douce de la Seine lors de la vidange de l'estuaire (basse mer). Si en période de marée moyenne (coefficient de 58) nous avons déjà noté une légère arrivée d'eau dessalée en surface, l'eau de la Seine qui arrive sur le site d'étude en Baie de Seine, dans ces conditions de mesure du 21 mars 2000, est marquée par une salinité aussi basse que 24 PSU. Tout au long du cycle de marée, cette dessalure affecte les cinq premiers mètres superficiels, mais au moment de la basse mer, toute la colonne d'eau (9 mètres) est influencée par ces eaux dessalées (21-22 h, *fig. III-69a*). Simultanément, les concentrations en MES montrent des valeurs élevées ( $\sim 50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) sur l'ensemble de la colonne d'eau (*fig. III-69b*). Malheureusement, c'est au cours de la fin du jusant que les enregistrements de la CTD ont été défaillants pendant 3 heures.



**Figure. III-68.** Evolution des paramètres hydrosédimentaires au cours du point fixe de 14 mars 1999 (coefficient de 58, débit de la Seine de  $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). **a)** salinité, **b)** concentration pondérale en MES, **c)** température et **d)** vitesses des courants de marée.

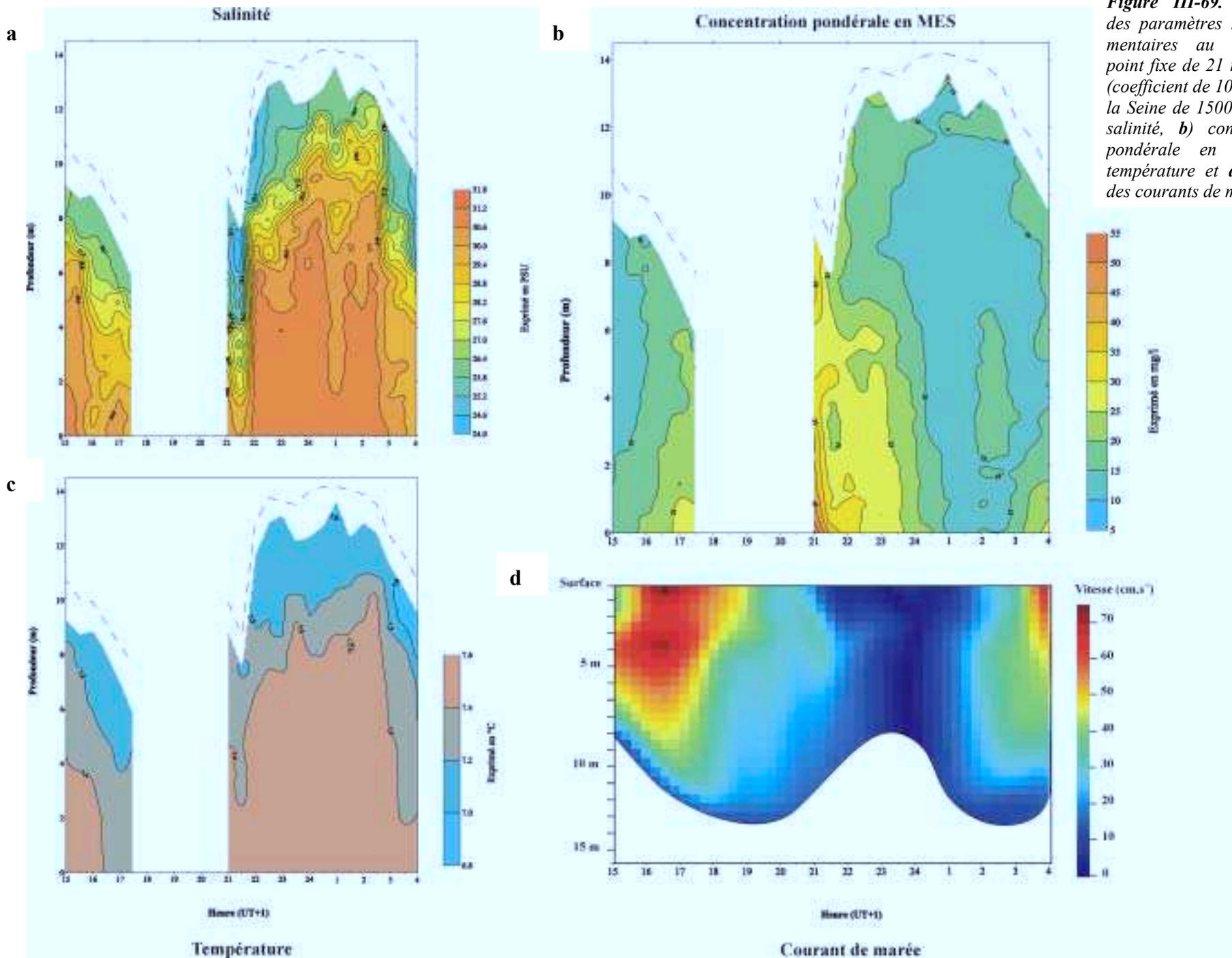


Figure III-69. Evolution des paramètres hydrosédimentaires au cours du point fixe de 21 mars 2000 (coefficient de 107, débit de la Seine de  $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). **a)** salinité, **b)** concentration pondérale en MES, **c)** température et **d)** vitesses des courants de marée.

Lors de ce point fixe, des mesures microgranulométriques ont été réalisées, permettant de caractériser la taille des particules présentes aux différents niveaux de la colonne d'eau au cours du cycle de marée. Les résultats montrent que les MES présentes dans la masse d'eau sont caractérisées par 2 types de populations (*fig. III-70*): (1) de petites particules dont la moyenne granulométrique est centrée autour de 6 à 10  $\mu\text{m}$  et (2) des grosses particules centrées autour de 80-120  $\mu\text{m}$ . La figure III-70 présente l'évolution de la granulométrie des échantillons d'eau récoltés en surface, à mi-profondeur et au fond au cours de quatre moments du cycle de marée. La proportion des deux populations de particules est assez similaire en période de flot (23h, BM+3 et 02h, BM+6) ou de jusant (16h30, BM-4). Par contre, au moment de la basse mer à 21h00 (BM / BM+1), ce sont les particules les plus petites qui caractérisent l'ensemble des MES de la colonne d'eau (*fig. III-70*). On enregistre encore au fond, 2h30 après cette mesure (23 h), une concentration assez élevée de ces mêmes particules.

### 7.3.3 Synthèse: caractéristiques hydrosédimentaires et courantologiques sur le site du point fixe

Pour les six séries de mesures réalisées, les profils de salinité, température et concentration en MES obtenus sont très variés (*tabl. III-10*). Pour des conditions analogues de débit de la Seine (21 et 28 février 2000), les changements concernant les trois paramètres mesurés dans la colonne d'eau sont liés à l'intensité des courants de marée au moment de la mesure. Par faible coefficient (35/31, ME), aucun gradient vertical dans la tranche d'eau n'est observé au cours du cycle de marée que ce soit pour les MES, la température ou la salinité (*tabl. III-10*). Toutefois, un gradient vertical des concentrations en MES apparaît dans les deux premiers mètres au voisinage du fond; celui-ci est à mettre au compte d'une remise en suspension de sédiments fins sur le site. Lors des forts coefficients de marée (18 mai 1999 et 21 mars 2000), la stratification des eaux est très marquée, cette fois en relation avec le débit de la Seine (*tabl. III-10*). Lors d'un fort coefficient couplé à un débit moyen (18 mai 1999), il n'existe pas de gradient vertical dans la colonne d'eau. Par contre, la combinaison de grandes vives-eaux et de débits élevés de la Seine (21 février 2000) est favorable à l'apparition d'une stratification marquée pour la température et encore plus pour la salinité (*tabl. III-10*): l'arrivée d'eau douce turbide de la Seine affecte toute la tranche d'eau entre BM et BM+3 et se maintient ensuite dans les quatre premiers mètres superficiels tout au long du cycle de marée. Ces eaux chargées en MES mesurées au point fixe à plus de 15 km de l'embouchure de la Seine proviennent de l'expulsion de matériaux fins lors des crues, sous la forme d'une plume turbide. Les MES expulsées intègrent à la fois les sédiments issus du bassin versant et ceux préalablement stockés à l'embouchure au sein du bouchon vaseux; en effet, on sait que dans des conditions de crue ( $> 800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) et de marée de vives-eaux le bouchon vaseux est partiellement ou totalement expulsé en Baie de Seine (*cf. chapitre I, p. 41*).

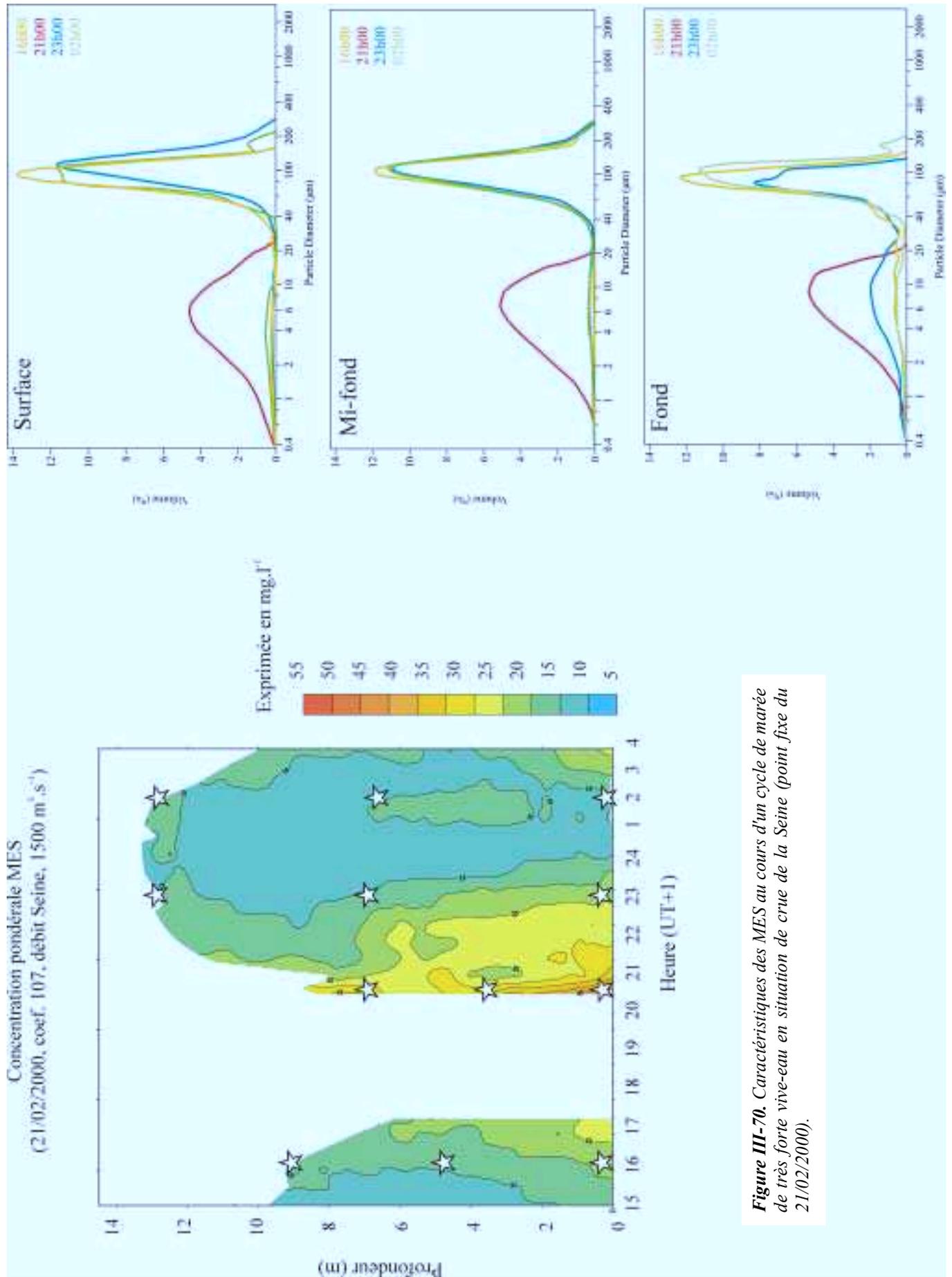


Figure III-70. Caractéristiques des MES au cours d'un cycle de marée de très forte vive-eau en situation de crue de la Seine (point fixe du 21/02/2000).

Date	Coefficient de marée	la Seine (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Température (°C)			Salinité (PSU)			Teneur en MES (mg.l <sup>-1</sup> )		
			Min	Max	Résultat	Min	Max	Résultat	Min	Max	Résultat
24 sept. 1998	78	220	16,9	18,9	Absence de gradient vertical	31,9	33,7	Absence de gradient vertical	0	31	Absence de gradient vertical
14 mars 1999	58	1550	8	9,4	Gradient vertical: 1,4°C entre la surface (9,4°) et le fond (8,0°)	30,2	32,6	Gradient vertical: 1,6 PSU entre la surface (31,2) et le fond (33,0)	0	20	Gradient vertical: couche turbide au fond (22 mg.l <sup>-1</sup> )
18 mai 1999	103/98	450	13,5	14,4	Absence de gradient vertical	31,2	32,4	Absence de gradient vertical	0	80	Gradient vertical: couche turbide au fond (> 60 mg.l <sup>-1</sup> )
21 février 2000	107/107	1500	6,8	7,6	Gradient vertical inverse: 0,8°C entre la surface (6,8°) et le fond (7,6)	24	31,8	Gradient vertical: 7,8 PSU entre la surface (24,0) et le fond (31,8)	0	55	Absence de gradient vertical mais teneur > 10 mg.l <sup>-1</sup> au fond
28 février 2000	35/31	1250	7,9	8,1	Absence de gradient: homogène sur la tranche d'eau (0,2°C)	29,7	31	Absence de gradient	0	55	Gradient vertical: couche turbide au fond (> 30 mg.l <sup>-1</sup> )

Tableau III-10. Evolution des paramètres hydrosédimentaires en Baie de Seine orientale au cours des points fixes au large de Villers-sur-mer (49°21,68'N et 00°01,98'W).

Cette contribution fluviale aux dépôts de particules fines en Baie orientale a été récemment modélisée numériquement (modèle hydrosédimentaire tridimensionnel SAM-3D; Cugier & Le Hir, 2002). Une couche turbide au voisinage du fond (néphéloïde) est généralement détectée lors des mesures *in situ*. Elle peut avoir pour cause (1) soit des apports en MES de la Seine, (2) soit la remise en suspension, par les courants de marée et les fortes houles résiduelles, des sédiments fins déposés. Les courants de marée, même par faibles coefficients, sont capables de remettre en suspension du matériel fin et de déplacer ces MES (Avoine *et al.*, 1986). Nos mesures par marée de mortes-eaux montrent également cette remise en suspension (*fig. III-67*). Cette couche turbide évolue au maximum à 4 m au-dessus du fond et se maintient souvent tout au long du cycle de marée. Elle est maximale au cours du flot (i.e. BM+1 et BM +5). Cette couche turbide de fond (à BM+1) est toujours présente (*tabl. III-10*), sauf par des conditions comme celles du 21 février 2000 (crue et grande vives-eaux) où elle affecte toute la tranche d'eau du fait de l'expulsion du bouchon vaseux à l'extérieur de l'estuaire.

La similitude des paramètres granulométriques des MES de la couche turbide et de la crème de vase déposée sur les secteurs de la vasière subtidale (e.g. mars 1999) suppose qu'une partie des MES transportée par le panache turbide se dépose par décantation (Garnaud *et al.*, 2002). Mais sous quel type d'écoulement turbide se produisent les apports de MES en Baie de Seine sud-orientale ?

D'une manière générale, les mesures en point fixe montrent l'influence des eaux douces de la Seine au début du flot avec une baisse significative des salinités dans les deux premiers mètres; toutefois, ces eaux ne sont pas ou peu chargées en MES. Par contre, le point fixe de mars 1999 montre une turbidité globalement plus élevée entre le fond et les quatre premiers mètres, peut-être lié à un écoulement sur le fond des eaux turbides, de type hyperpycnal. Mais en période conjuguée de grande vives-eaux et de crue, on enregistre de fortes valeurs de MES sur toute la colonne d'eau à basse mer et au début de jusant. Malgré le manque dans les données pour le point fixe du 21 février 2000, il semble exister une déconnection des masses d'eau turbides sur le site de mesure. L'une en surface pourrait être de type hypopycnal (*cf. définition chapitre I, p. 23-24*), l'autre pourrait correspondre à une advection d'eau chargée en MES près du fond depuis la zone estuarienne (écoulement de type hyperpycnal ?). Cette chute d'une partie de ces MES peut alors générer l'apparition d'un dépôt de crème de vase recouvrant le sable superficiel tel que celui observé en mars 1999.

#### 7.4 Impacts de crues hivernales sur la Baie de Seine sud-orientale (1998-2001)

Dans notre suivi de l'évolution de l'envasement de la Baie de Seine, nous avons déduit que la crue de l'hiver 1998-1999 a été l'épisode majeur responsable d'un envasement atypique des fonds subtidiaux de la zone d'étude. Cependant, comment expliquer que cette crue qui n'avait pas atteint des débits très élevés ( $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) au lieu de référence de Poses à 160 km de l'embouchure, ait eu un impact aussi important ? En effet, les crues de 2000 et surtout de 2001, pourtant plus fortes, n'ont eu aucun impact analogue décelable sur le secteur d'étude malgré des débits records (e.g.  $2280 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 27 et 28/03/2001). Quel contexte hydrosédimentaire favorise ce type de dépôt en ce domaine subtidal ?

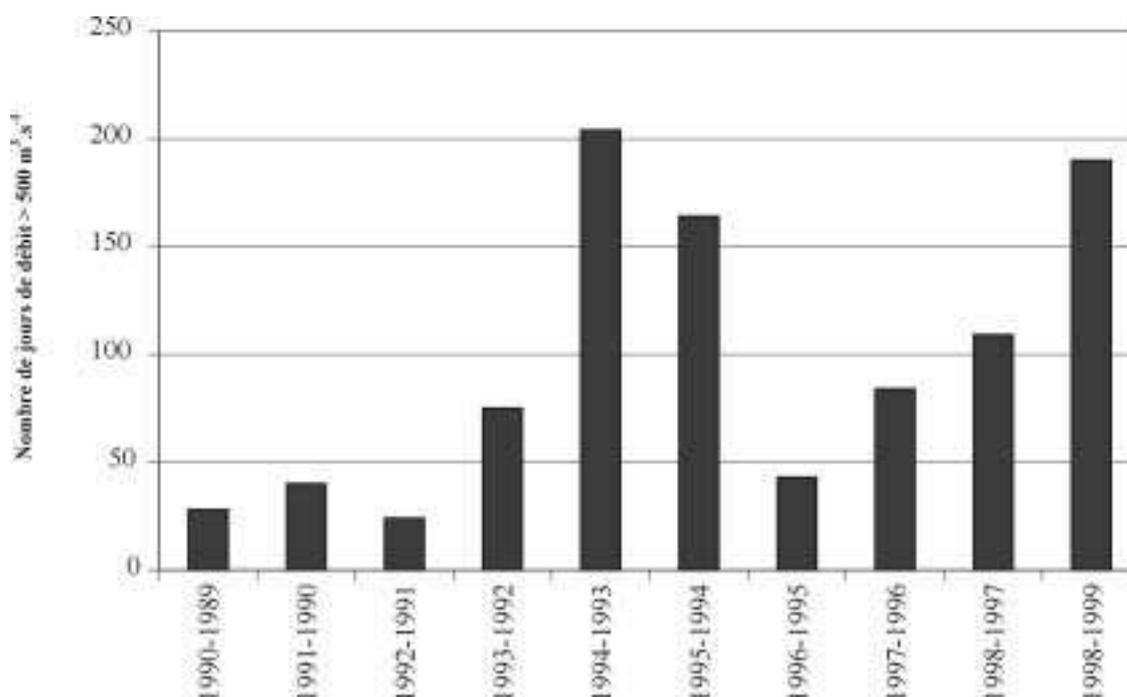
##### 7.4.1 Analyse de la crue hivernale de 1998-1999

Les mesures hydrologiques réalisées journalièrement par la cellule anti-pollution du port de Rouen depuis 1941 (*fig. III-71*) montrent qu'hormis de petites crues estivales (Guézennec, 1999), les crues de la Seine interviennent entre novembre et mars, avec statistiquement une tendance marquée pour la fin de l'hiver (février-mars).

Entre 1994 et 2001, les débits liquides mesurés à Poses au cours des périodes hivernales ont eu des valeurs maximales comprises entre  $1250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $2260 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (*fig. III-71*). Aux pics les plus marqués correspondent les apports particuliers les plus importants (*fig. III-71*) et au total la plupart des apports sédimentaires transitant annuellement à Poses (plus de 60%) sont enregistrés au cours de très courtes périodes, entre 30 et 70 jours par an. A titre d'exemple, entre le 1<sup>er</sup> décembre 1993 et le 31 janvier 1994 (2 mois), 700 000 tonnes de MES ont transité à Poses soit autant que pendant toute une année moyenne.

Il a été montré auparavant que lors du maximum de crue de mars 1999 ( $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), des vases fraîches d'épaisseur centimétrique recouvraient les sables du secteur d'étude de la vasière subtidale (*fig. III-33, p. 128*). Depuis cette date, et malgré les très forts débits liquides et solides enregistrés au cours de l'hiver 1999-2000, aucun dépôt vaseux analogue ne s'est mis en place sur le secteur d'étude. L'une des raisons probables est que les MES apportées par les crues ont été transportées par la plume turbide de la Seine et se sont déposées plus au large en Baie de Seine centrale, ou ont été entraînées vers la Manche orientale. Cette hypothèse est appuyée par le fait qu'à la même époque (février 2000), le Parfond, dépression située au droit de l'embouchure de la Seine (20 à 30 m de profondeur) était envasé, ce qui est inhabituel (Garnaud *et al.*, 2002). Un autre élément de réponse est apporté par la chronique hydrologique de la Seine. Avant l'épisode de la crue d'hiver 1998-1999, les débits de la Seine étaient restés modestes, sans crue importante

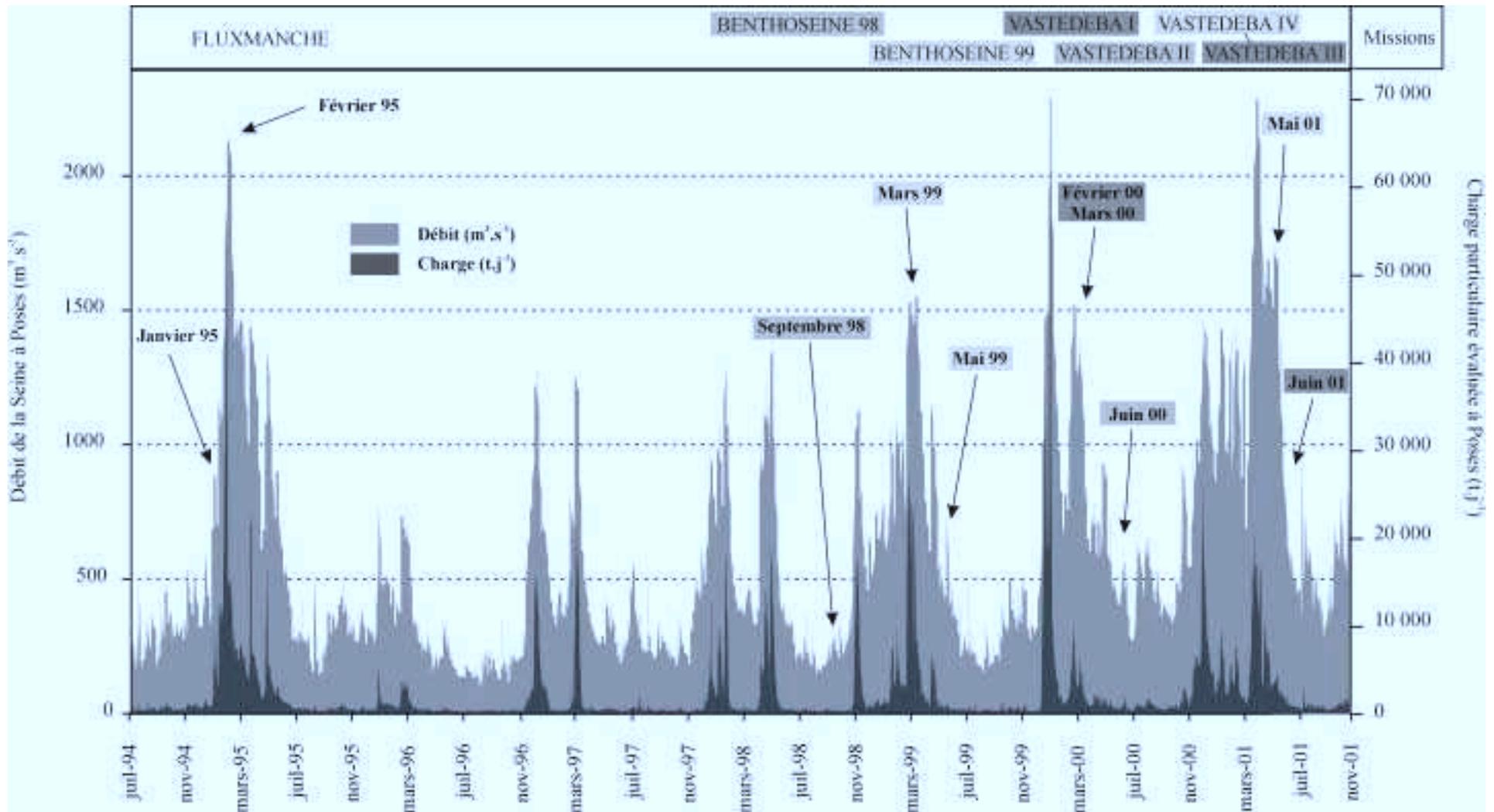
(< 1400 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, *fig. III-71*) durant les trois années précédentes, le dernier épisode important datant de février 1995. On constate un hiver très sec en 1995-1996, suivi de deux années où les crues saisonnières sont restées très modestes (< 20 000 t.j<sup>-1</sup>, *fig. III-71*), avec deux courts pics de crue séparés d'environ un mois. Ensuite, fin 1998, le débit liquide de la Seine n'a pas été très important, 1000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Il va par contre rester soutenu (> 500 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), pour réaugmenter en décembre et atteindre le maximum de 1500 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> en mars 1999. Ainsi cette crue hivernale 1998-1999 aura duré 190 jours (*fig. III-72*).



**Figure III-72.** Nombre de jours pendant lesquels le débit de la Seine a été supérieur à 500 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> depuis 10 ans.

#### 7.4.2 Commentaires sur la masse de sédiments fins déposée sur la vase subtidale en mars 1999

Lors de l'événement de fin d'hiver 1999, il apparaît que le matériel fin reconnu sur le secteur de la Baie de Seine orientale en mars 1999 ait concerné une masse de particule tellement importante (~ 0,3 et 0,75 10<sup>6</sup> tonnes, p. 131) qu'elle ne puisse être seulement expliquée par les seuls apports ayant transité à Poses lors de la crue (~ 0,65 10<sup>6</sup> tonnes). De surcroît, les particules fines qui transitent dans l'estuaire depuis Poses vers l'aval sont pour 1/5 à 1/3 piégées dans l'estuaire amont (Guézennec, 1999) et, une fois arrivée à l'embouchure, une partie des apports solides (non quantifiée) est expulsée loin en Baie de Seine et vers la Manche orientale.



**Figure III-71.** Historique du débit de la Seine (en gris) pendant la période juillet 1994-novembre 2001 et de la charge particulaire associée (en noir). Les mesures sont réalisées au barrage de Poses, à 160 km de l'embouchure de la Seine (données du SNS, Service de la Navigation de la Seine, cellule anti-pollution, A. Ficht). Avant 1995, deux équations empiriques étaient appliquées pour l'évaluation des concentrations pondérales de MES [ $C_{MES}$ ] en fonction des débits  $Q$ , estimés à Poses: pendant la montée de la crue [ $C_{MES}$ ] =  $10 * Q^{1,66}$ ; lors de la descente de crue et période d'étiage [ $C_{MES}$ ] =  $0,0344 * Q + 7,797$ . Depuis 1996, les mesures de la turbidité instantanée au barrage de Poses s'effectuent en continu, toutes les 15 minutes, à l'aide d'une sonde multiparamètre (YSI 6000) équipée d'un turbidimètre. Un étalonnage par filtration et pesée des MES est réalisé par le SNS en moyenne tous les 15 jours.

Le matériel apporté sur le secteur de la vasière subtidale doit donc trouver sa source plus à l'aval de Poses, ce qui suppose une source située entre ce site et la Baie de Seine. Il peut s'agir d'apports du bassin versant intra-estuarien (sols et limons loessiques facilement érodables par les fortes pluies), mais cette hypothèse n'est pas prouvée. On doit aussi considérer pour source le matériel temporairement présent au sein de l'estuaire; dans ce cas, il s'agit:

- (1) de particules stockées sur les vasières de la partie aval de l'estuaire, dont l'embouchure de la Seine. Lesourd *et al.* (2003) ont montré par exemple que la masse totale de sédiments érodés de la vasière intertidale nord de l'embouchure de la Seine, pendant une tempête de quelques jours, peut être de l'ordre de grandeur de celle du bouchon vaseux de la Seine (i.e. 0,2-0,4 10<sup>6</sup> t).
- (2) du bouchon vaseux, désormais en situation très aval dans l'estuaire, son centre de gravité et sa concentration en MES fluctuant en fonction du débit fluvial et des conditions de marée (Avoine, 1981) (*cf. chapitre I, fig. I-17, p. 41*).
- (3) de vases fluides présentes sous forme de crème de vase au fond des chenaux, dont le chenal de navigation de la Seine.

Ces particules sont d'origine composite, à la fois terrigène et marine (*cf. § 6.1.2*). En effet, du matériel ayant séjourné en domaine marin se voit stocké de manière temporaire au sein de l'estuaire aval du fait de l'asymétrie de la marée ("pompage tidal"), prépondérante en condition d'étiage et de fortes marées. Dans le même temps, le remaniement de matériel des vasières intertidales de l'estuaire amont (Guézennec, 1999) représente une contribution différée des apports en particules fines alimentant, en étiage et en vives-eaux, l'estuaire aval (Guézennec *et al.*, 1999). Ces processus de concentration de particules fines au sein de l'estuaire (amont et aval) sont particulièrement développés lorsque des débits fluviaux faibles surviennent au cours de plusieurs années, l'espace disponible, en particulier les zones intertidales de l'estuaire encore disponibles, jouant un rôle de "puits sédimentaire".

Les premières crues combinées avec de fortes houles (fortes conditions dépressionnaires) ont une influence érosive sur le matériel stocké dans l'estuaire qui est acheminé, par effet de vidange, vers l'embouchure (Lesourd, 2000) et vers les petits fonds subtidaux de la proche Baie de Seine (cette étude). L'estuaire aval joue alors un rôle de source de matériel. Ainsi, pendant la période été 1995-automne 1998 caractérisée par de faibles débits moyens (*fig. III-71*), une partie des MES apportées lors des crues saisonnières (~ de 0,5 10<sup>6</sup> tonnes pour les trois années) avait été stockée dans l'estuaire aval. Lors de la crue soutenue (190 jours) de l'hiver 1998-1999, ces sédiments stockés (i.e. vasière intertidale, bouchon vaseux et crème de vase) au cours de ces trois années de déficit hydrique relatif ont été ajoutés à la charge particulaire directe du fleuve. Cet épisode peut donc ainsi être qualifié de "crue estuarienne".

Il est toutefois difficile d'estimer la charge particulaire réelle expulsée pendant ces quatre mois. Sur la zone d'étude de la Baie de Seine sud-orientale, les masses déposées évaluées sont importantes entre 0,3 et 0,75  $10^6$  tonnes; il est donc probable que la masse totale des sédiments fins expulsés lors de cette crue estuarienne était très largement supérieure à 1  $10^6$  tonnes.

Depuis cet épisode, les débits maxima ont atteint des valeurs record en 2000 et 2001 sans qu'aucun dépôt de vase analogue à celui de début 1999 n'ait été mis en évidence sur le secteur de la vasière temporaire. Outre que les MES ont été transportées plus loin en mer, on peut penser que les débits de la Seine ayant été soutenus depuis octobre 1998, le stock particulaire au sein de l'estuaire aval ne se soit pas reconstitué. Cette hypothèse est confirmée par les études sur la vasière Nord de l'embouchure de la Seine qui demeure dépourvue d'engraissement important depuis cette date.

## 8. Conclusions

### 8.1 Couverture sédimentaire et formes associées

Les sédiments superficiels de la Baie de Seine sud-orientale s'ordonnent selon un gradient d'affinement d'ouest en est, en direction des côtes du Calvados et de l'embouchure de la Seine, contrôlé par les courants de marée. Ainsi, les sédiments grossiers n'apparaissent qu'à l'ouest du domaine d'étude pour tendre vers un affinement: sables fins et vases sableuses vers le littoral. Les mesures des teneurs en carbonates tendent à montrer que depuis moins de 20 ans, les fortes fractions carbonatées (40 et 50%) se sont étendues légèrement vers l'est. Les carbonates étant liés à la fraction coquillière, ceci suggère son augmentation dans les sables.

Nos levés de sonar à balayage latéral (250 km de profils) réalisés entre 2000 et 2001 ont permis de caractériser les figures sédimentaires présentes dans les fonds subtidaux du domaine d'étude et de cartographier les sédiments reliques à l'affleurement. Les petits fonds marins montrent des structures sédimentaires de type mégarides, voiles sableux et sillons d'érosion. Les figures les plus fréquentes sont les sillons d'érosion (plus de 150 localisés) ornés de mégarides de houles constituées de sédiments grossiers de type coquilles brisées. La mise en place de ces formes sédimentaires est probablement à mettre en relation avec les fortes houles de tempêtes. Les sillons se creusent exclusivement dans les argiles reliques sous-jacentes. Ces sillons, déjà reconnus en 1982-1983, étaient profonds d'environ 1 mètre, or actuellement, leur profondeur excède rarement plus de 50 cm. Les carottages effectués aux travers de ces dépôts permettent d'exclure un remplissage des sillons depuis 1982. La

seule explication d'une diminution de la profondeur des sillons est l'érosion des fonds avoisinants. Cette observation va dans le sens des résultats antérieurs (*cf.* chapitre II) avec la mise en évidence d'une érosion active des fonds de la Baie de Seine sud-orientale. En effet, dès 1929, Volmat (1929) suggérait une érosion des fonds de la Baie de Seine orientale à l'est du méridien d'Houlgate avec un abaissement moyen des fonds de 0,68 m pour la période 1834-1913, soit  $0,85 \text{ cm.an}^{-1}$  en moyenne. La réduction de 50 cm de la profondeur des sillons depuis les 20 dernières années permet de proposer un taux d'érosion très supérieur en ce même secteur, de l'ordre de  $2,5 \text{ cm.an}^{-1}$ .

La prospection au sonar a aussi permis de localiser au droit du port de Deauville, par -3 et -4 m CM de profondeur, un faciès acoustique sombre situé hors du contexte des argiles reliques présentes beaucoup plus à l'est. Le calibrage de ces images acoustiques à l'aide de bennes et carottes courtes montre que ce faciès est principalement constitué de balanes et de moules juvéniles reposant vraisemblablement sur un substrat grossier de type graviers et galets. Ce secteur se situe sur l'ancien emplacement de grands ensembles intertidaux sablo-graveleux présents au NE de Deauville 150 ans plus tôt.

Les fonds de la Baie de Seine orientale, réputés monotones, sont donc riches en faciès particuliers correspondant à une dynamique propre aux différents sites.

## 8.2 Sources de sédiments fins

De multiples sources peuvent être associées dans les envasements de la couverture sédimentaire sableuse de la Baie de Seine. La présence d'interstratifiés dans le cortège argileux des sédiments fins actuels a permis de montrer la filiation entre la fraction fine présente dans la couverture sédimentaire et les sédiments argileux fossiles: dépôts reliques au large d'Houlgate et falaises callovo-oxfordiennes du Calvados. Les résultats obtenus à partir des mesures de radionucléides artificiels  $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$  montrent des valeurs anormalement basses sur le secteur des vasières littorale et subtidale. Ces anomalies sont probablement en relation avec l'incorporation d'une source sédimentaire aux teneurs plus faibles, ou nulle, soit les apports particuliers de la Seine soit l'érosion littorale et/ou l'érosion des argiles reliques subtidales. La diversité des sources d'apports en particules fines et la dynamique complexe de la Baie de Seine orientale rendent impossible l'évaluation de la contribution relative de chaque source.

## 8.3 Transports sédimentaires

L'utilisation du modèle Gao et Collins dans l'étude de la dynamique des sables envasés du secteur d'étude permet de montrer des sens de transport différents en fonction

des saisons. En hiver, les sables et les vases sont acheminés vers un dépo-centre situé sur le secteur des vasières subtidale et littorale. Par contre, les transports sédimentaires calculés sur des prélèvements réalisés au début de l'été sont dirigés vers l'est, en direction de l'estuaire. Ce résultat suggère un schéma complexe dans le transfert des particules en Baie de Seine sud-orientale au cours des saisons, avec une partie des sédiments fins apportés en hiver réintégrant un stockage au sein de l'estuaire de la Seine.

#### 8.4 Mesures hydrosédimentaires et "crues estuariennes"

A l'échelle de temps saisonnière, les apports de crue de la Seine sont la source essentielle des sédiments fins comme ceux observés en mars 1999 dans les petits fonds subtidaux. Cette conclusion est appuyée par des mesures hydro-sédimentaires qui montrent en condition hivernale de forte crue une stratification très marquée de la masse d'eau en relation avec une arrivée d'eau saumâtre turbide à plus de 15 km de l'embouchure de la Seine à basse mer. Même si des crues interviennent chaque année, des placages bien individualisés de sédiments fins ne sont pas apparus depuis 1999 sur la zone d'étude de la Baie de Seine sud-orientale. En mars 1999, la masse estimée de sédiments fins observés en recouvrement des sables sur le seul secteur des radiales d'étude représente déjà 22 à 37% de la charge particulaire totale enregistrée à Poses durant cette crue ( $\sim 0,65 \cdot 10^6$  tonnes); elle atteindrait même des valeurs similaires à l'ensemble la charge solide passée à Poses lors de cette crue en extrapolant les calculs à l'ensemble de la vasière subtidale. Cette quantité importante de matériel sédimentaire implique la contribution d'autres sources de sédiments fins, stockés au sein de l'estuaire en aval du barrage de Poses, et qui s'ajoutent aux sédiments apportés du bassin versant amont lors de la crue. Ces sources additionnelles sont (1) le "décapage" des vasières latérales de l'estuaire de la Seine, (2) le bouchon vaseux et (3) la crème de vase en dépôt temporaire au fond des chenaux, notamment le chenal de navigation de la Seine. Ainsi, dès que survient une crue soutenue après une période de débits relativement faibles, ces sédiments intra-estuariens sont remobilisés et intégrés à la charge solide apportée par le fleuve pour être finalement expulsés hors de l'estuaire. C'est dans ce contexte réunissant à la fois la présence d'un stock de sédiments fins intra-estuarien conséquent et une situation de crue soutenue, que se mettent en place des placages de vase fraîche en Baie de Seine sud-orientale lors de ces crues que l'on qualifiera donc de "crues estuariennes". Ces dépôts de crue sont progressivement remobilisés au cours des mois qui suivent leur mise en place.

Le processus d'envasement décrit en Baie de Seine sud-orientale doit être analogue dans le cas de fonds marins ouverts situés à proximité d'embouchure comme pour l'Orne (Dubrulle, 1982) ou dans d'autres estuaires en voie de comblement mais aussi pour certains deltas (e.g. delta du Rhône, Antoneli, 2002; delta du Mississippi, Coleman *et al.*, 1998). Si on les compare à d'autres systèmes côtiers, ces dépôts de crue n'apparaissent pas

systématiquement après des épisodes de pluie exceptionnelles comme, par exemple, ceux de l'Eel river (*cf. annexe 4*). Les dépôts temporaires de la Baie de Seine se distinguent donc de ces crues dites "océaniques". Elles correspondent néanmoins à un même caractère événementiel pour leur rapidité de mise en place (*cf. annexe 4*). Les dépôts que nous avons observés en Baie de Seine sud-orientale en mars 1999 sont le résultat d'un ensemble complexe de conditions spécifiques au domaine fortement macrotidal de l'estuaire de la Seine et de sa morphologie avec des sections restreintes de l'écoulement. L'environnement macrotidal (forts courants de marée) et peu profond (action des houles) de la Baie de Seine orientale est toutefois peu propice à la préservation, même partielle, de ces dépôts à l'échelle des saisons et des années suivantes, contrairement à d'autres systèmes, e.g. la côte ouest des USA où, dans un environnement plus profond (50-70 m), des dépôts de crue de l'Eel river datant du siècle dernier sont encore préservés (Sommerfield *et al.*, 2002).

### 8.5 La Baie de Seine orientale, une zone d'envasement en continue évolution

Les fluctuations de la répartition des sédiments fins observées sur le secteur d'étude ont été importantes depuis le début de notre suivi saisonnier continu en septembre 1998 et jusqu'en juin 2001. Ceci est observé aussi bien grâce à l'échantillonnage intense de l'ensemble du domaine côtier que par le suivi de deux radiales atelier au large de Villers-sur-Mer. Nos études dévoilent ainsi un secteur subtidal très actif énergiquement, où les fractions fines sont en continuel mouvement. Le seul épisode de sédimentation fine significatif en mars 1999 sur les vasières littorale et subtidale, entre -3 et -8 m CM, a été suivi par une diminution de l'envasement. La tendance actuelle est au retour à une situation où les moyennes en fraction fine sont de l'ordre de 5-6%, peu supérieures à la situation de janvier-février 1995 (moins de 4%), suggérant un léger envasement de ce secteur des fonds de la Baie de Seine.

Enfin, les teneurs en fraction fine dans les sédiments de l'ensemble du système embouchure-Baie de Seine orientale répondent à des fluctuations saisonnières avec des envasements évoluant de manière diachrone du fait de deux mécanismes indépendants : (1) les apports fluviaux en suspension lors des crues d'hiver (envasement de l'embouchure) et (2) l'action modérée des houles en été (dépôt privilégié de fraction fine sur le secteur d'Antifer). Par contre, les envasements du domaine sud-oriental de la Baie de Seine sont marqués par des apports sous forme de "pulses" sédimentaires estuariens pouvant apporter des quantités de vases estimées, comme en mars 1999, à plus de 500 000 tonnes.

---

**Bibliographie du chapitre III**

---

- Allison, M.A., Kineke, G.C., Gordon, E.S. & Goni, M.A.** (2000). Development and reworking of a seasonal flood deposit on the inner continental shelf off the Atchafalaya River. *Continental Shelf Research* 20, 2267-2294.
- Alzieu, C.** (1999). Dragages et environnement marin: état des connaissances, 224 p.
- Aminot, A., Kerouel, R. & Mauvais, J.L.** (1986). Les éléments nutritifs en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 24-26 avril 1985, 289-296.
- Aminot, A., Guillaud, J.-F. & Kérouel, R.** (1997). La Baie de Seine: hydrologie, nutriments et chlorophylle (1978-1994). *Repère Océan*, 14. IFREMER, Brest, 148 p.
- Antoneli, C.** (2002). Flux sédimentaire et morphogénèse dans le chenal du Rhône aval. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université d'Aix-Marseille III*, 280 p.
- Aqua-Fact International Service Ltd.** (1995). SPI mapping of the Baie de Seine in the English Channel. 25 p.
- Arbouille** (1987). La sédimentation de la plate-forme continentale Nord-aquitaine au Quaternaire terminal: un exemple de système transgressif. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Bordeaux I*, 196 p.
- Auffret, J.P., Walker, P. & d'Ozouville, L.** (1984). Le sonar à balayage latéral et ses applications à l'étude des transports sédimentaires en Manche. *XVIII<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique*. Société Hydrotechnique de France, Marseille, I.14.1-I.14.7.
- Auffret, J.-P. & d'Ozouville, L.** (1986). Apports de l'imagerie fournie par le sonar à balayage latéral à la connaissance de la dynamique sédimentaire en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 201-209.
- Auffret, J.P., Guegueniat, P., Lepy, M.C., Patry, J.P. & Saur, H.** (1986). Les radionucléides émetteurs gamma dans les sédiments de l'estuaire de l'Orne pendant les années 1977-1983. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 24-26 avril 1985, 273-282.
- Auffret, J.-P., Augris, C., Cabioch, L. & Koch, P.** (1992). Sillons graveleux aux abords de la Baie de Morlaix. *Annales de la Société Géologique du Nord* 1 (2<sup>ème</sup> série), 143-147.
- Augris, C. & Clabaut, P.** (2001). Cartographie géologique des fonds marins côtiers. Exemples le long du littoral français. Bilans et prospectives. IFREMER, Brest, 75 p.
- Avoine, J.** (1981). L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 236 p.
- Avoine, J.** (1986a). Evaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de la Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 61-68.
- Avoine, J.** (1986b). Sediment exchanges between the Seine estuary and its adjacent shelf. *Journal of the Geological Society, London* 144, 135-148.
- Avoine, J.** (1992). Etude d'impact de la deuxième passerelle transmanche de Caen-Ouistreham - Etude de la dispersion des rejets de dragages à l'aide de traceurs fluorescents. *Rapport DDE Calvados*, 70 p.
- Avoine, J.** (1994). Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. *Rapport d'étude, IFREMER - Port autonome du Havre*, Brest, 153 p.
- Avoine, J., Allen, J.P., Nichols, M., Salomon, J.C. & Larssonneur, C.** (1981). Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France: effect of man-made modification on estuary-shelf sedimentology. *Marine Geology* 40, 119-137.
- Avoine, J., Crevel, L., Dubrulle, L., Boust, D. & Guegueniat, P.** (1984a). Sédiments et dynamique sédimentaire en Baie de Seine. *XVIII<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique*. Société Hydrotechnique de France, Marseille, I.3.1-I.3.8.

- Avoine, J., Larsonneur, C., Caillot, A., Hoslin, R., Massias, J. & Quesney, M.** (1984b). Mise en évidence des mouvements sédimentaire en Baie de Seine à l'aide de traceurs radioactifs - Contribution à l'étude du comblement de l'estuaire de la Seine. *XVIII<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique*. Société Hydrotechnique de France, Marseille, I.2.1-I.2.8.
- Avoine, J., Caillot, A., Hoslin, R., Larsonneur, C., Massias, J. & Quesney, M.** (1986). Contribution des traceurs radioactifs à l'étude des mouvements sédimentaires en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 211-218.
- Avoine, J. & Larsonneur, C.** (1987). Dynamics and behaviour of suspended sediment in macrotidal estuaries along the south coast of the English Channel. *Continental Shelf Research* 7 (11/12), 1301-1305.
- Avoine, J., Texier, H. & Quillard, J.** (1993). Les rejets de dragage du port Caen-Ouistreham. Impacts hydrosédimentaires et géochimiques. *Université de Caen*, 9 p.
- Avoine, J., Lesueur, P. & Rouault, T.** (1996). Evolution morphologique et couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Actualisation et fluctuations. *Rapport programme Seine-Aval 1995/FIN-1, Thème Hydrodynamique et transport sédimentaire*, 2-20.
- Bailly du Bois, P., Rozet, M., Thorat, K. & Salomon, J.C.** (1997). Improving knowledge of water-mass circulation in the English Channel using radioactive tracers. *Radioprotection* 32 (C2), 63-69.
- Bailly du Bois, P. & Guéguéniat, P.** (1999). Quantitative assessment of dissolved radiotracers in the English Channel: Sources, average impact of la Hague reprocessing plant and conservative behaviour (1983, 1986, 1988, 1994). *Continental Shelf Research* (19), 1977-2002.
- Berné, S., Augustin, J.-M., Braud, F., Chene, G. & Walker, P.** (1986). Cartographie et interprétation de la dynamique sédimentaire des plates-formes continentales: améliorations de la technique d'observation par sonar latéral. *Bulletin de la Société Géologique de France* 8 (3), 437-446.
- Berné, S., Allen, G., Auffret, J.-P., Chamley, H., Durand, J. & Weber, O.** (1989). Essai de synthèse sur les dunes hydrauliques géantes tidales actuelles. *Bulletin de la Société Géologique de France* 8 (6), 1145-1160.
- BIOTEC** (2002). Etude sur les possibilités d'utilisation des techniques douces appliquées à la protection et la réhabilitation des berges de la Seine entre Rouen et Tancarville.  
<http://www.environnement.gouv.fr/haute-normandie/etudes/bergesSeine.pdf>, *DIREN Haute-Normandie*, 75 p.
- Blackford, J.J. & Chambers, F.M.** (1995). Proxy climate of the last 10,000 years from Irish blanket peat and a possible link to solar variability. *Earth and Planetary Science Letters* 133, 145-150.
- Blanchart, E., King, D., Le Bissonnais, Y., Bourguignon, A., Souchère, V., Desprats, J.-F. & Maurizot, P.** (1999). Paramétrisation du potentiel de ruissellement des bassins versants au moyen de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques. *Etude et Gestion des Sols* 6 (3), 181-199.
- Borgeld, J.C., Clarke, J.E.H., Goff, J.A., Mayer, L.A. & Curtis, J.A.** (1999). Acoustic backscatter of the 1995 flood deposit on the Eel river. *Marine Geology* 154, 197-210.
- Boust, D.** (1996). Utilisation des radionucléides naturels et artificiels pour l'étude et la quantification de processus hydrosédimentaires dans l'estuaire de la Seine. *Rapport programme Seine-Aval 1995/FIN-1, Thème Hydrodynamique et transport sédimentaire*, 65-77.
- Boust, D.** (1997). Distribution and inventory of some naturally-occurring and artificial radionuclides on coarse-grained sediments of the channel. *Final report of FLUXMANCHE, hydrodynamics and Biogeochemical Processes and Fluxes in the channel*, 90-99.
- Boust, D.** (1999). Distribution and inventories of some artificial and naturally occurring radionuclides in medium to coarse-grained sediments of the channel. *Continental Shelf Research* (19), 1959-1975.
- Boust, D., Colin, C., Leclerc, G. & Baron, Y.** (1997). Distribution and transit times of plutonium-bearing particles throughout the Channel. *Radioprotection* 325 (C2), 123-128.

- Boust, D., Lesueur, P., Rozet, M., Solier, L. & Ficht, A.** (2002). The dynamics of  $^{60}\text{Co}$ -labelled sediment particles in the Seine estuary. *Actes du congrès ECORAD, 3-7 sept 2001, Radioprotection - Colloques*, Aix en Provence, France, C1-749/ C741-754.
- Briffa, K.R., Bartholin, T.S., Eckstein, D., Jones, P.D., Karlén, W., Schweingruber, F.H. & Zetterberg, P.** (1990). A 1400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia. *Nature* 391, 678-682.
- Brown, W.M.I. & Ritter, J.R.** (1971). Sediment transport and turbidity in the Eel River basin, California. *U.S. Geological Survey Water-Supplement papers 1986*, 70 p.
- Brunet, C., Brylinski, J.M., Bodineau, L., Thoumelin, G., Bentley, D. & Hilde, D.** (1996). Phytoplankton dynamics during the spring bloom in the south-eastern English Channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 43, 469-483.
- Brylinski, J.M., Lagadeuc, Y., Gentilhomme, V., Dupont, J.-P., Lafite, R., Dupeuble, P.-A., Huault, M.-F., Auger, Y., Puskaric, E., Wartel, M. & Cabioch, L.** (1991). Le fleuve côtier: un phénomène hydrologique important en Manche Orientale. Exemple du Pas de Calais. *Oceanologica Acta* 11, 197-203.
- Cacchione, D.A., Drake, D.E., Grant, W.D. & Tate, G.B.** (1984). Rippled scour depressions on the inner continental shelf off central California. *Journal of Sedimentary Petrology* 54, 1280-1291.
- Carrigny, J.D. & Sanchez, A.** (1999). Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly of discharge loss. *Marine Geology* 158, 125-145.
- Carrigny, J.D., Sanchez, A. & Camacho-Ibar, V.F.** (2001). Sedimentation in the northern gulf of California after cessation of the Colorado River discharge. *Sedimentary Geology* 144, 37-42.
- Chamley, H.** (1989). Clay sedimentology. *Springer-Verlag*, 623 p.
- Chamley, H.** (2002). Environnements géologiques et activités humaines. L'impact des activités humaines sur le milieu naturel. Sciences de la Terre et de l'Univers. *Vuibert*, 512 p.
- Chang, Y.H., Scrimshaw, M.D. & Lester, J.N.** (2001). A revised grain-size trend analysis program to define net sediment transport pathways. *Computers & Geosciences* 27 (1), 109-114.
- Cirac, P., Berné, S., Castaing, P. & Weber, O.** (2000). Processus de mise en place et d'évolution de la couverture sédimentaire superficielle de la plate-forme nord-aquitaine. *Oceanologica Acta* 23 (6), 663-686.
- Cochrane, G.R. & Lafferty, K.D.** (2002). Use of acoustic classification of sidescan sonar data for mapping benthic habitat in the Northern Channel Islands, California. *Continental Shelf Research* 22 (5), 683-690.
- Coleman, J.M., Roberts, H.H. & Stone, G.W.** (1998). Mississippi river delta: an overview. *Journal of Coastal Research* 14 (3), 698-716.
- Cugier, P.** (1999). Modélisation du devenir à moyen terme dans l'eau et le sédiment des éléments majeurs (N,P, Si) rejetés par la Seine en Baie de Seine. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 249 p.
- Cugier, P. & Le Hir, P.** (2000). Modélisation 3D des matières en suspension en baie de Seine orientale (Manche, France). *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris* 331 (série IIa), 287-294.
- Cugier, P. & Le Hir, P.** (2002). Development of 3D hydrodynamic model for coastal ecosystem modeling. Application to the plume of the Seine River (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 55 (5), 673-695.
- Curran, K.J., Hill, P.S. & Milligan, T.G.** (2002). Fine-grained suspended sediment dynamics in the Eel River flood plume. *Continental Shelf Research* 22 (17), 2537-2550.
- Cutshall, N.H., Larson, I.L., Olsen, C.R., Nittrouer, C.A. & DeMaster, D.J.** (1986). Columbia River sediment in Quinault canyon, evidence from artificial radionuclides. *Marine Geology* 71, 125-136.
- Drake, D.E.** (1976). Suspended sediment transport and mud deposition on continental shelves. In:

- Stanley, D.J. & Swift, D.J.P. (Editors), Marine sediment transport and environmental management. *John Wiley & Sons*, New York, 127-158.
- Drake, D.E. & Cacchione, R.W.** (1985). Seasonal variation in sediment transport on the Russian River shelf, California. *Continental Shelf Research* 4, 495-514.
- Dubrulle, L.** (1982). Etude hydrosédimentaire de l'estuaire de l'Orne et de ses abords. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 212 p.
- Dubrulle, L. & Larssonneur, C.** (1984). Dynamique sédimentaire de l'estuaire de l'Orne. *XVIII<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique*. Société Hydrotechnique de France, Marseille, I.6.1-I.6.6.
- Dugué, O.** (1989). Géodynamique d'une bordure de massifs anciens: la bordure occidentale du bassin Anglo-Parisien au Callovo-Oxfordien. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 477 p.
- Dugué, O.** (1991). Comportement d'une bordure de massifs anciens et cortèges de minéraux argileux: l'exemple de la bordure occidentale du Bassin Anglo-Parisien au Callovo-Oxfordien. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 81, 323-346.
- Dupont, J.-P., Lafite, R., Huault, M.-F., Dupeuble, P.-A., Brylinski, J.-M., Guéguéniat, P., Lamboy, M. & Cabioch, L.** (1991). La dynamique des masses d'eaux et des remises en suspension en Manche orientale. *Oceanologica Acta* 11, 177-186.
- Dupont, J.-P., Lafite, R., Huault, M.-F., Hommeril, P. & Meyer, R.** (1994). Continental/marine ratio changes in suspended and settled matter across a macrotidal estuary (the Seine estuary, northwestern France). *Marine Geology* 120, 27-40.
- Dupont, J.-P., Guézennec, L., Lafite, R., Le Hir, P. & Lesueur, P.** (2001). Matériaux fins. Le cheminement des particules en suspension. Programme scientifique Seine-Aval, 4. *IFREMER*, 40 p.
- Ehrhold, A.** (1999). Dynamique de comblement d'un bassin sédimentaire soumis à un régime mégatidal: exemple de la Baie du Mont-Saint-Michel. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen, Caen*, 294 p.
- Ehrhold, A. & Auffret, J.-P.** (1996). Approche bi-dimensionnelle des transports sédimentaires à partir des variations granulométriques des sédiments superficiels: exemple de la partie occidentale de la Baie du Mont-Saint-Michel. *IV<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier*, Dinard, 277-284.
- Ferrini, V. & Flood, R.D.** (2002). Multibeam sonar on the inner shelf of the Eel margin: nearshore gravel-floored troughs. *Eos Trans. AGU*, 83 (47). Abstract OSC-0297.
- Fily, G.** (1967). Etude sédimentologique et hydrologique de l'estuaire de l'Orne et du littoral adjacent (de Langrune à Cabourg). *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 128 p.
- Flageollet, J.C., Gigot, P., Helluin, E. & Maquaire, O.** (1987). Studies on landslides in Normandy (France), in view of their occurrence probability. *Fifth International Conference and Field Workshop on Landslides*, Australia & New Zealand 1st - 12th august 1987, 225-233.
- Flood, R.D.** (1981). Distribution, morphology, and origin of sedimentary furrows in cohesive sediments, Southampton water. *Sedimentology* 28, 511-529.
- Flood, R.D.** (1983). Classification of sedimentary furrows and a model for furrow initiation and evolution. *Geological Society of America Bulletin* 94, 630-639.
- Gao, S.** (1996). A fortran program for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways. *Computers & Geosciences* 22 (4), 449-452.
- Gao, S. & Collins, M.** (1991). A critique of the "Mc Laren method" for defining sediment transport paths. *Journal of Sedimentary Petrology* 61, 143-146.
- Gao, S. & Collins, M.** (1992). Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". *Sedimentary geology* 80, 47-60.
- Gao, S. & Collins, M.** (1994). Analysis of grain-size trends for defining sediment transport pathways in marine environment. *Journal of Coastal Research* 10 (1), 70-78.

- Gao, S., Collins, M., Lanckneus, J., De Moor, G. & Van Lanckner, V.** (1994). Grain size trends associated with net transport sediment patterns: an example from the Belgian continental shelf. *Marine Geology* 121, 171-185.
- Gao, S. & Collins, M.** (1995). Net sand transport direction in a tidal inlet, using foraminiferal tests as natural tracers. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 40 (6), 681-697.
- Garnaud, S. & Lesueur, P.** (2001). Etude des sédiments fins dans la Baie de Seine - Rapport final année 2000-2001. *Contrat CNRS 51.01.09*, 46 p.
- Garnaud, S., Lesueur, P., Lesourd, S., Garlan, T., Clet, M. & Brun-Cottan, J.-C.** (soumis). Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner shelf (eastern Bay of the Seine, France). *Marine Geology*.
- Garnaud, S., Poizot, E., Méar, Y., Lesueur, P., Lesourd, S. & Brun-Cottan, J.-C.** (2001). Transport sédimentaire résiduel en domaine subtidal: application et amélioration de l'approche de Gao et Collins à la Baie de Seine orientale. *8<sup>ème</sup> Congrès Français de Sédimentologie - Livre des résumés*. ASF, Paris, Orléans, 163-164.
- Garnaud, S., Lesueur, P., Lesourd, S., Poupinet, N. & Brun-Cottan, J.-C.** (2002). Caractérisation des variations lithologiques saisonnières des sédiments de la Baie de Seine orientale; impact des crues de la Seine (France). *Comptes Rendus Geoscience* 334, 323-330.
- Garreau, P. & Bailly du Bois, P.** (1997). Transportation of radionuclide in Celtic Sea a possible mechanism. *Radioprotection* 32 (C2), 381-385.
- Germain, P.** (1970). Etude sédimentologique et hydrologique de l'estuaire de la Dives et du littoral adjacent (Cabourg-Houlgate). *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 77 p.
- Germaneau, J.** (1968). Etude de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine. Origine, déplacement et dépôt des sables. *Travaux de Recherche et d'Etude Océanographique VIII* (1-2), 1-63.
- Germano, J.D.** (2002). Sediment Profile Imaging (SPI), rapid seafloor reconnaissance and assessment. <http://www.remots.com>.
- Geyer, W.R., Beardsley, R.C., Candela, J., Castro, B.M., Legeckis, R.V., Lentz, S.J., Limeburner, R., Miranda, L.B. & Trowbridge, J.H.** (1991). The physical oceanography of the Amazon outflow. *Oceanography* 4, 8-14.
- Geyer, W.R., Hill, P., Milligan, T. & Traykovski, P.** (2000). The structure of the Eel River plume during floods. *Continental Shelf Research* 20, 2067-2093.
- Goff, J.A., Wheatcroft, R.A.b., Lee, H., Drake, D.E., Swift Donald, J.P. & Fan, S.** (2002). Spatial variability of shelf sediments in the STRATAFORM natural laboratory, Northern California. *Continental Shelf Research* 22, 1199-1223.
- Grove, J.M.** (1988). The Little Ice Age. *Methuen*, London, 498 p.
- Grove, J.M.** (2001). The initiation of the "Little Ice Age" in regions round the North Atlantic. *Climatic Change* 48, 53-82.
- Guéguéniat, P., Auffret, J.-P. & Baron, Y.** (1979). Evolution de la radioactivité artificielle gamma dans des sédiments littoraux de la Manche pendant les années 1976-1977-1978. *Oceanologica Acta* 2 (2), 165-180.
- Guézennec, L.** (1999). Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal: l'exemple de l'estuaire de la Seine (France). *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Rouen*, 240 p.
- Guézennec, L., Lafite, R., Dupont, J.-P., Meyer, R. & Boust, D.** (1999). Hydrodynamics of suspended particulate matter in the tidal freshwater zone of a macrotidal estuary (the Seine estuary, France). *Estuaries* 22 (3A), 717-727.
- Héquette, A. & Hill, P.R.** (1993). Storm-generated currents and offshore sediment transport on a sandy shoreface, Tibjak Beach, Canadian Beaufort Sea. *Marine Geology* 113, 283-304.

- Hill, P.S., Milligan, T.G. & Geyer, W.R. (2000). Controls on effective settling velocity of suspended sediment in the Eel River flood plume. *Continental Shelf Research* 20 (16), 2095-2111.
- Holzapffel, T. (1985). Les minéraux argileux. Préparation. Analyses diffractométriques et détermination, 12. *Société géologique du Nord*, Université de Lille, 136 p.
- Hunter, R.E., Thor, D.R. & Swiher, M.L. (1982). Depositional and erosional features of the inner shelf, northeastern Bering Sea. *Geologie en Mijnbouw* 61, 49-62.
- Hunter, R.E., Dingler, J.R., Anima, R.J. & Richmond, B.M. (1988). Coarse-sediment bands on the inner shelf of Southern Monterey bay, California. *Marine Geology* 80, 81-98.
- Inman, D.L. & Jenkins, S.A. (1999). Climatic change and the episodicity of sediment flux of small California rivers. *Journal of Geology* 107, 251-270.
- Jamagne, M., Hardy, R., King, D. & Bornand, M. (1995). La base de donnée géographique des sols de France. *Etude et Gestion des Sols* 2 (3), 153-172.
- Javelle, P. (2001). Caractérisation du régime des crues: le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG)*, 277 p.
- Juhe, C. (1999). Comportement hydrosédimentaire dans un secteur de vasière littorale soumise à de forts courants de marée. *Rapport de Maîtrise, Université de Rouen*, 44 p.
- Karlin, R. (1980). Sediment sources and clay mineral distributions off the Oregon coast. *Journal of Sedimentary Petrology* 50, 543-560.
- King, D., Jamagne, M., Arrouays, D., Bornand, M., Favrot, J.C., Hardy, R., Le Bas, C. & Stengel, P. (1999). Inventaire cartographique et surveillance des sols en France. Etat d'avancement et exemples d'utilisation. *Etude et Gestion des Sols* 6 (4), 215-228.
- Knebel, H.J., Needell, S.W. & O'Hara, C.J. (1982). Modern sedimentary environments on the Rhode Island inner shelf, off the eastern United States. *Marine Geology* 49, 241-256.
- Knebel, H.J. & Poppe, L.J. (2000). Sea-floor environments within Long Island Sound: a regional overview. *Journal of Coastal Research* 16, 533-550.
- Knox, J.C. (2000). Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change. *Quaternary Science Reviews* 19, 439-457.
- Laboratoire Central d'Hydraulique de France (1984). Catalogue sédimentologique des côtes françaises - Côtes de la Mer du Nord et de la Manche à la frontière belge, 1606. *Eyrolles*, 408 p.
- Lamb, H.H. (1979). Climatic variation and changes in the wind and ocean circulation: the Little Ice Age in the northeast Atlantic. *Quaternary Research* 11, 1-20.
- Lanckness, J., De Moor, G., De Schaepmeester, G., Meyus, I. & Spiers, V. (1992). Residual sediment transport directions on a tidal sand bank. *Bulletin de la Société Belge d'Etudes Géographiques* 2, 425-446.
- Larsonneur, C. (1971). Manche centrale et Baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles, *Thèse d'Etat de l'Université de Caen*, 394 p.
- Larsonneur, C. (1985). Dynamique des suspensions et des dépôts en Baie de Seine : une synthèse des résultats. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 93-108.
- Larsonneur, C. & Hommeril, P. (1967). Sédiments et sédimentation dans la partie orientale de la Baie de Seine. *Extrait de la revue des sociétés savantes de Hautes-Normandie* 47, 45-75.
- Larsonneur, C. & Avoine, J. (1981). Détermination des flux de matières en suspension en Baie de Seine. Contrat IFREMER 81/6559. *Contrat IFREMER 81/6559, Laboratoire de géologie marine, Université de Caen*, 45 p.
- Le Bot, S. (2001). Morphodynamique de dunes sous-marines sous influence des marées et des tempêtes. Processus hydro-sédimentaires et enregistrement. Exemple du Pas-de-Calais. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle*,

Université de Lille I, 272 p.

- Le Bot, S., Trentesaux, A. & Ehrhold, A.** (2001). Contrôle exercé par les bancs sableux sur la morphodynamique des dunes. Apports pour la modélisation du transport sédimentaire résiduel par la méthode de Gao et Collins. 8<sup>ème</sup> Congrès Français de Sédimentologie - Livre des résumés. ASF, Paris, Orléans, 211-212.
- Le Floch, J.-F.** (1961). Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine et en Seine-Maritime, *Thèse d'Etat de la Faculté des sciences de l'Université de Paris*, 494 p.
- Le Hir, P. & Silva Jacinto, R.** (2001). Courants, vagues et marées: les mouvements de l'eau. Programme Scientifique Seine-Aval, 2. *IFREMER*, 31 p.
- Le Roux, J.P.** (1994a). An alternative approach to the identification of net transport paths based on grain-size trends. *Sedimentary Geology* 94, 97-107.
- Le Roux, J.P.** (1994b). Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". *Sedimentary Geology* 90, 153-156.
- Le Roux, J.P., O'Brien, R.D., Rios, F. & Cisternas, M.** (2002). Analysis of sediment transport paths using grain-size parameters. *Computers & Geosciences* 28, 717-721.
- Le Roy Ladurie, L.** (1983). Histoire du climat depuis l'An Mil (2 volumes). *Flammarion*, 541 p.
- Lecouturier, M., Grochowski, N., Bishop, C., Wilkin, M., Avoine, J., Levoy, F., Velegrakis, A.F. & Collins, M.B.** (1997). Sub-task S1 : measurement of processes at the sediment/water interface, Final report of FLUXMANCHE, hydrodynamics and Biogeochemical Processes and Fluxes in the channel, 101-120.
- Leithold, E.L. & Hope, R.S.** (1999). Deposition and modification of a flood layer on the northern California shelf: lessons from and about the fate of terrestrial particulate organic carbon. *Marine Geology* 154, 183-195.
- Lesourd, S.** (2000). Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal: zoom temporel du siècle à l'heure; application à l'estuaire de la Seine. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 280 p.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Garnaud, S. & Poupinet, N.** (2003). Seasonal variations in the characteristics of superficial sediments in a macrotidal estuary (the Seine inlet, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 52, 1-14.
- Lesueur, P.** (1992). Les vasières de la plate-forme ouest-girondine (France): modèle faciologique et archive sédimentaire des flux côtiers. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Bordeaux*, 197 p.
- Lesueur, P. & Lesourd, S.** (1999). Sables, chenaux, vasières. Dynamique des sédiments et évolution morphologique. Programme scientifique Seine-Aval, 3. *IFREMER*, 39 p.
- Lesueur, P., Garnaud, S., Méar, Y., Lafite, R., Poizot, E., Brun-Cottan, J.-C. & Dupont, J.-P.** (2002). Distribution et variabilité des sédiments fins en Baie de Seine orientale. *Bilan du Chantier Baie de Seine, Réunion du Conseil Scientifique*, Dinard.
- Malamud, B.D. & Turcotte, D.L.** (2003). Shelf record of climatic changes in flood magnitude and frequency, north-coastal California: comment. *Geology* 31 (3), 288-288.
- Mallet, C., Howa, H., Garlan, T., Sottolochio, A. & Le Hir, P.** (2000a). Residual transport model in correlation with sedimentary dynamics over an elongate tidal sandbar in the Gironde estuary (southwestern France). *Journal of Sedimentary Research* 70 (5), 1005-1016.
- Mallet, C., Howa, H., Garlan, T., Sottolochio, A., Le Hir, P. & Michel, D.** (2000b). Utilisation of numerical and statistical techniques to describe sedimentary circulation patterns in the mouth of the Gironde estuary. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris* 331, 491-497.
- Mc Laren, P. & Bowles, D.** (1985). The effects of sediment transport on grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology* 55, 457-470.
- McManus, J.** (1988). Grain size determination and interpretation. In: Tucker, M. (Eds.), *Techniques in Sedimentology*. Blackwell, Oxford, 63-85.

- Meybeck, M., Mouchel, J.M., Idlafkich, Z., Andreassian, V. & Thibert, S.** (1998). Transferts d'eau, de matière dissoute et particulaire dans le réseau fluvial. In: Meybeck, M. (Editor). *La Seine et son bassin. Fonctionnement écologique d'un système anthropisé*. Elsevier, 345-389.
- Milliman, J.D. & Syvitski, J.P.M.** (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *Journal of Geology* 100, 525-544.
- Moore, D.M. & Reynolds, R.C.** (1989). X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. *Oxford University Press*, 332 p.
- Morang, A. & McMaster, R.L.** (1980). Nearshore bedform patterns along Rhode Island from side-scan sonar surveys. *Journal of Sedimentary Petrology* 50 (3), 831-840.
- Nittrouer, C.A. & Kravitz, J.H.** (1996). STRATAFORM: A program to study the creation and interpretation of sedimentary strata on continental margins. *Oceanography* 9 (3), 146-152.
- O'Connor, B.D.S., Costelloe, J., Keegan, B.F. & Rhoads, D.C.** (1989). The use of Remots technology in monitoring coastal enrichment resulting from mariculture. *Marine Pollution Bulletin* 30 (8), 384-390.
- Park, Y.A. & Khim, B.K.** (1992). Origin and dispersal of recent clay minerals in the Yellow Sea. *Marine Geology* 104, 205-213.
- Pedrerros, R., Howa, H.L. & Michel, D.** (1996). Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas. *Marine Geology* 135 (1-4), 35-49.
- Poizot, E., Thomas, M., Méar, Y. & Garnaud, S.** (soumis). GIS Based Grain Size Trend Analysis Of The South Eastern Bay Of Seine, France. *Journal of Coastal Research*.
- Poppe, L.J., Knebel, H.J., Lewis, R.S. & DiGiacomo-Cohen, M.L.** (2002). Processes controlling the remobilization of superficial sediment and formation of sedimentary furrows in north-central Long Island sound. *Journal of Coastal Research* 18 (4), 741-750.
- Reimnitz, E., Toimil, L.J., Shepard, F.P. & Gutiérrez-Estrado, M.** (1976). Possible rip-current origin for bottom ripple zone to 30-m depth. *Geology* 4, 395-400.
- Rhoads, D.C. & Germano, J.D.** (1982). Characterization of organism-sediment relations using sediment profile imaging: an efficient method of remote ecological monitoring of the sea-floor (REMOTS system). *Marine Ecology Progress Series* 8, 115-128.
- Rîmbu, N., Boroneant, C., Buta, C. & Dima, M.** (2002). Decadal variability of the Danube river flow in the lower basin and its relation with the North Atlantic Oscillation. *International Journal of Climatology* 22 (10), 1169-1179.
- Ruessink, B.G., Houwman, K.T. & Hoekstra, P.** (1998). The systematic contribution of transporting mechanisms to the cross-shore sediment transport in water depths of 3 to 9m. *Marine Geology* 152, 295-324.
- Russel, P.E.** (1993). Mechanisms for beach erosion during storms. *Continental Shelf Research* 13, 1243-1265.
- SAUM** (1980). Estuaire de la Seine: études hydrosédimentaire (J. Avoine, 95 p.), études des suspensions (J.-P. Dupont & F. David, 56 p.), programme géochimie (D. Boust, 52 p.), analyses par activation neutronique (P. Guégueniat, 13 p.). *dossier n°4, eau et sédiments*, 216 p.
- Segall, M.P. & Kuehl, S.A.** (1992). Sedimentary processes on the Bengal continental shelf as revealed by clay-size mineralogy. *Continental shelf research* 12, 517-541.
- Shipp, R.C.** (1984). Bedforms and depositional sedimentary structures of a barred nearshore system, eastern Long Island, New York. *Marine Geology* 60, 235-259.
- SHOM** (1968). Les courants de marée dans la mer de la Manche et sur les côtes Françaises de l'Atlantique, 550. *Paris*, 176 p.
- Sloan, J., Miller, J.R. & Lancaster, N.** (2001). Response and recovery of the Eel River, California, and

- its tributaries to floods in 1955, 1964, and 1997. *Geomorphology* 36, 129-154.
- Sommerfield, C.K. & Nittrouer, C.A.** (1999). Modern accumulation rates and a sediment budget for the Eel shelf: a flood-dominated depositional environment. *Marine Geology* 154, 227-241.
- Sommerfield, C.K., Nittrouer, C.A. & Alexander, C.R.** (1999). <sup>7</sup>Be as a tracer of flood sedimentation on the northern California continental margin. *Continental Shelf Research* 19, 335-361.
- Sommerfield, C.K., Drake, D.E. & Wheatcroft, R.A.** (2002). Shelf record of climatic changes in flood magnitude and frequency, north-coastal California. *Geology* 30 (5), 395-398.
- Spineanu, A.** (1998). Mobilité des sédiments fins en Baie de Seine (Manche). *Mémoire de DEA, Université de Lille/Orsay*, 56 p.
- Stepanian, A.** (1997). Détermination de la direction de transport des sédiments en domaine intertidal. *Mémoire de maîtrise de Sciences de l'Environnement, option Océanologie, Université de Bordeaux I*, 24 p.
- Sternberg, R.W.** (1981). Sedimentation processes on continental shelves. In: Haq, B.U. & Milliman, J.D. (Editors). *Marine geology and oceanography of Arabian sea and coastal Pakistan*. Scientific and Academic Editions, New York, 137-157.
- Sudry, M.L.** (1911). Les sédiments marins des côtes du Calvados. *Comptes rendus du congrès des sociétés savantes de Paris et des départements*. Imprimerie Nationale, Caen, 25-32.
- Swift, D.J.P.** (1978). Current lineations and sand waves on the inner shelf, Middle Atlantic Bight of North America. *Journal of Sedimentary Petrology* 48 (4), 1257-1266.
- Swift, D.J.P., Freeland, G.L. & Young, R.A.** (1979). Time and space distribution of megaripples and associated bedforms, Middle Atlantic Bight, North American Atlantic shelf. *Sedimentology* 26, 389-406.
- Syvitski, J.P. & Morehead, M.D.** (1999). Estimating river-sediment discharge to the ocean: application to the Eel margin, northern California. *Marine Geology* 154, 13-28.
- Thiébaud, E.** (1996). Distribution of *Pectinaria koreni* larvae (annelida: polychaeta) in relation to the Seine river plume front (eastern English Channel). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73, 383-397.
- Thoulet** (1908-1909). Etude des fonds marins de la Baie de Seine. *Annales hydrographiques*, 1-28.
- Turcq, B.** (1984). Faciès et formes sédimentaires du plateau continental nord aquitain, réponse aux processus hydrodynamiques actuels. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Bordeaux*, 192 p.
- Turcq, B., Cirac, P., Berné, S. & Weber, O.** (1986). Caractéristiques des environnements sédimentaires de la plate-forme continentale nord-aquitaine en relation avec les processus hydrodynamiques actuels. *Bulletin de l'Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine* 39, 149-164.
- Twichell, D.C., Zajac, R.N., Poppe, L.J., Lewis, R.S., Cross, V., Nichols, D. & DiGiacomo-CohenMary, L.** (1998). Bathymetric, sidescan sonar image, and superficial geologic interpretation of Long Island Sound off Norwalk, Connecticut. *US Geological Survey, Woods Hole*, New York, <http://pubs.usgs.gov/openfile/of98-502/chapt502/502norwalk/frontp502.htm>
- Vanwesenbeeck, V. & Lanckneus, J.** (2000). Residual sediment transport paths on a tidal sand bank: a comparison between the modified Mc Laren model and bedform analysis. *Journal of Sedimentary Research* 70 (3), 470-477.
- Verlaan, P.A.J. & Spanhoff, R.** (2000). Massive sedimentation events at the mouth of the Rotterdam waterway. *Journal of Coastal Research* 16 (2), 458-469.
- Videau, C., Ryckaert, M. & L'Helguen, S.** (1998). Phytoplankton en Baie de Seine. Influence du panache fluvial sur la production primaire. *Océanologica Acta* 21 (6), 907-921.
- Volmat, M.** (1929). Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. *22<sup>ème</sup> cahier de la recherche hydrographique sur le régime des côtes*, 97-135.
- Walker, P.** (2002). Dynamique sédimentaire dans le golfe normand-breton. Intérêt de l'imagerie par sonar

à balayage latéral. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 289 p.

- Wheatcroft, R.A.** (2000). Oceanic flood sedimentation: a new perspective. *Continental Shelf Research* 20, 2059-2066.
- Wheatcroft, R.A., Borgeld, J.C., Born, R.S., Drake, D.E., Leithold, E.L., Nittrouer, C.A. & Sommerfield, C.K.** (1996). The anatomy of an oceanic flood deposit. *Oceanography* 9 (3), 158-162.
- Wheatcroft, R.A. & Borgeld, J.C.** (2000). Oceanic flood deposits on the northern California shelf: large-scale distribution and small-scale physical properties. *Continental Shelf Research* 20, 2163-2190.
- Wu, J.X. & Shan, H.T.** (1999). Estuarine bottom sediment transport based on the 'McLaren model': a case study of Huangmaohai Estuary, South China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49, 265-279.

# Chapitre IV

---

## Sédimentation fine holocène dans l'actuelle Baie de Seine sud-orientale

<b>1. Introduction .....</b>	<b>217</b>
<b>2. Les dépôts holocènes de la Baie de Seine: bilan des connaissances.....</b>	<b>218</b>
2.1 Dépôts quaternaires de la basse vallée de la Seine.....	218
2.2 La zone intertidale: les formations tourbeuses de la côte du Calvados.....	219
2.3 Zone subtidale: les fonds marins reliques au large de Cabourg.....	221
<b>3. Histoire du remplissage holocène de la Baie de Seine sud-orientale: nouveaux résultats .....</b>	<b>223</b>
3.1 Missions de carottages longs en 2000 et 2001 .....	223
3.2 Résultats: reconstitution lithostratigraphique du remplissage holocène de la Baie de Seine sur le secteur d'étude .....	226
3.2.1 Les dépôts sableux subtidaux .....	226
3.2.1.1 Résultats .....	226
3.2.1.2 Interprétation de la carotte 2686.....	228
3.2.2 Séquence des dépôts holocènes argileux .....	229
3.2.2.1 Faciès, structures et interprétations des dépôts sédimentaires .....	229
3.2.2.2 Données radiochronologiques .....	234
3.2.2.3 Teneurs en carbonates .....	235
3.2.2.4 Teneurs en carbone organique.....	237
3.2.2.5 Caractéristiques physiques: teneurs en eau et cohésion .....	241
3.2.2.6 Minéralogie des argiles .....	241
3.2.2.7 Analyse palynologique .....	243
3.3 Etude de dépôts reliques intertidaux de la plage de Franceville-Merville .....	248
3.3.1 Résultats .....	248
3.3.2 Conclusion .....	251
<b>4. Synthèse: séquence type du comblement holocène de la Baie de Seine sud-orientale.....</b>	<b>252</b>

## Chapitre IV

---

# Sédimentation fine holocène dans l'actuelle Baie de Seine sud-orientale

### 1. Introduction

Les études menées sur les dépôts holocènes en Baie de Seine orientale ont porté presque exclusivement sur les affleurements tardiglaciaires et post-glaciaires continentaux situés entre Asnelles et Ver-sur-Mer (Elhai & Larsonneur, 1969; Larsonneur, 1971; Clet-Pellerin *et al.*, 1987; Lautridou *et al.*, 1987), en Baie de Veys (Larsonneur, 1977), dans la basse vallée de l'Orne (Clet-Pellerin *et al.*, 1976; Pellerin, 1977) ou dans l'embouchure de la Seine (Ters *et al.*, 1971; Huault *et al.*, 1974; Lefebvre *et al.*, 1974; Huault, 1977; Lefebvre, 1977a, b). Cependant, quelques carottages en mer réalisés dans les années 1970 et le long d'une radiale au large de Cabourg en 1979, avaient permis de déceler l'existence de sédiments reliques d'âge présumé holocène subaffleurant au nord de l'embouchure de la Dives (Avoine, 1981, 1994). Ces dernières études sont toutefois restées ponctuelles; en outre, aucune donnée de datation absolue des dépôts n'avait été effectuée.

Dès les premières missions de prélèvements réalisées au cours de ce travail de doctorat (février 2000), il a été vérifié que la couverture sédimentaire superficielle actuelle pouvait être très mince, voire inexistante, sur certains sites d'échantillonnage (*cf. chapitre III*). Les carottes courtes (Reineck) montrent que ces sites sont composés d'une argile compacte fossile, observée directement à l'affleurement ou recouverte simplement d'une fine couche de sédiments sableux ou sablo-vaseux. Compte tenu de la superficie des dépôts concernés et de la possible participation des argiles reliques à l'alimentation en particules fines de la Baie de Seine (*cf. chapitre III*), il nous a semblé nécessaire de poursuivre les investigations de ces dépôts. Ainsi, deux missions (sonar à balayage latéral et carottages) ont été programmées afin de déterminer l'extension actuelle et l'âge de ces sédiments fossiles. Les carottages les plus longs (Küllenberg et vibrocarottier) ont permis d'obtenir des carottes atteignant plus de 4 m. La présence de ces dépôts marins fossiles très proches de la côte (jusqu'à -3 m CM) m'a également amené à prospecter le domaine intertidal le long des plages du Calvados à la recherche d'affleurements reliques susceptibles d'être comparés avec les prélèvements subtidaux. En plus des dépôts déjà signalés dans l'ancien cours du ruisseau de Luc-sur-Mer (*cf. annexe 5*) et à

Omaha beach, de larges surfaces d'argiles compactes tourbeuses ont été observées sur la plage de Franceville à la limite intertidale inférieure, à quelques kilomètres seulement des dépôts observés en mer. Ce chapitre fait le bilan des résultats obtenus à la fois en domaine subtidal et intertidal entre Cabourg et Deauville.

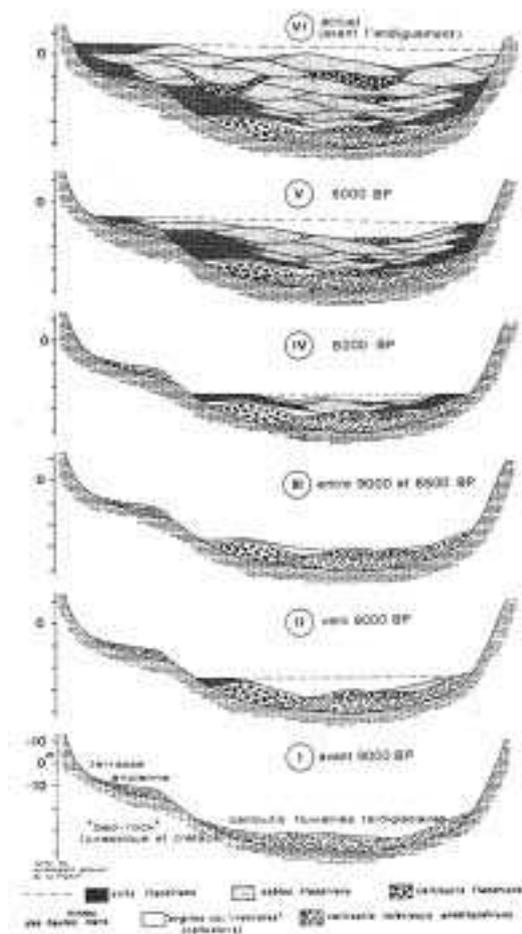
## 2. Les dépôts holocènes de la Baie de Seine: bilan des connaissances

### 2.1 Dépôts quaternaires de la basse vallée de la Seine

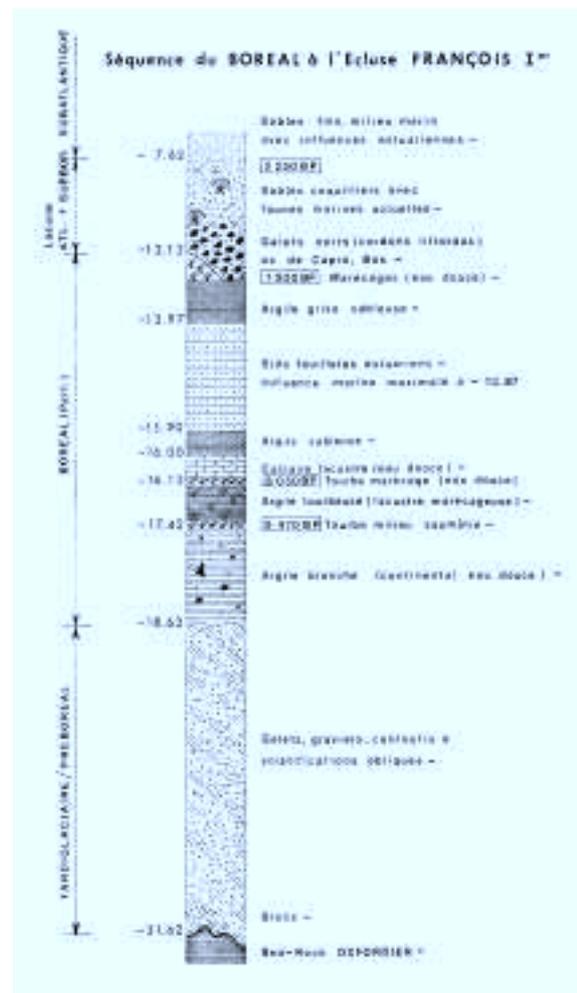
L'histoire du Quaternaire récent et la nature du remblaiement alluvial de l'estuaire de la Seine sont bien documentés grâce à des études de sismique réflexion (Auffret & Larsonneur, 1977; Auffret & d'Ozouville, 1986) et à de nombreux forages effectués lors des travaux d'aménagement portuaire du Havre (Ters *et al.*, 1971; Guyader, 1977; Larsonneur, 1977; Lefebvre, 1977b; Pellerin, 1977; Porcher, 1977). La paléovallée de la Seine et de l'estuaire aval montrent un comblement qui atteint au maximum 30 m d'épaisseur, constitué des unités suivantes:

- 1) une nappe alluviale (*fig. IV-1*) qui comporte des cailloutis et des graviers de fond hétérométriques reposant sur le substrat rocheux entaillé par le fleuve Seine à la fin du Quaternaire; elle est surmontée de cailloutis tardiglaciaires qui proviennent en partie du remaniement des basses terrasses weichséliennes,
- 2) des niveaux discontinus de sédiments fins continentaux, antérieurs à l'invasion de l'estuaire par la mer, tapissent les cailloutis. Ce sont principalement des argiles blanches (*fig. IV-2*) ou grises à faune terrestre ou dulçaquicole, des sables fins, des silts et localement des tufs et des tourbes (silts argileux à passées tourbeuses postglaciaires) datant de la fin Boréal et du début de l'Atlantique (8 000 ans BP),
- 3) des dépôts saumâtres et marins résultant de la transgression marine flandrienne: silts et tourbes, sédiments fins coquilliers et cailloutis depuis le Boréal jusqu'au Subatlantique (*figs. IV-1 et IV-2*).

Dans la partie estuarienne, la succession des apports continentaux et marins se caractérise par de grandes lentilles de sables à l'intérieur du remblaiement alluvial postglaciaire (*fig. IV-1*). Les datations  $^{14}\text{C}$  et les analyses palynologiques de cette séquence de remplissage ont montré l'existence de deux épisodes régressifs au cours de la transgression flandrienne, l'un peu avant 8 000 ans BP et l'autre vers 7 200 ans BP à la fois en Baie de Seine et dans l'estuaire (Huault *et al.*, 1974; Lefebvre *et al.*, 1974; Clet-Pellerin *et al.*, 1976).



**Figure IV-1.** Etapes du comblement de l'estuaire de la Seine; coupes transversales schématiques (Lefebvre, 1977a).



**Figure IV-2.** Log stratigraphique des dépôts d'âge boréal du port du Havre (écluse François I<sup>er</sup>) (Guyader, 1977).

## 2.2 La zone intertidale: les formations tourbeuses de la côte du Calvados

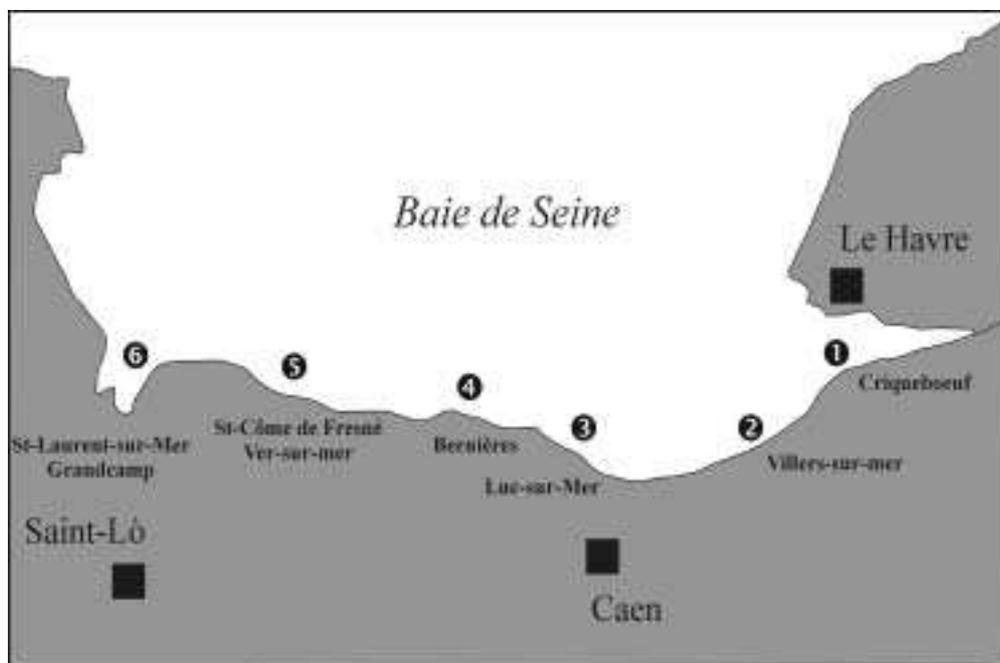
Les tourbières actuelles ou quaternaires se sont formées dans un écosystème de zone humide permettant l'accumulation de matières organiques (minimum 20 à 30%) mal décomposées et de matières colloïdales inorganiques dans un environnement saturé en eau et en conditions anaérobies (Taborin, 1999). Les changements climatiques qui ont affecté le Quaternaire ont influencé la couverture végétale. Ainsi, l'identification des grains de pollen et des spores conservés dans les sédiments humides, et particulièrement dans les tourbes, permet de suivre les variations climatiques. Les tourbes retrouvées en Baie de Seine à la fois en domaine continental et dans les fonds marins subtidaux sont de bons marqueurs paléoclimatiques et environnementaux.

Le littoral du Calvados possède quelques petites tourbières à l'intérieur des terres, mais les plus importantes se situent à quelques mètres au-dessous du niveau des hautes-mers. Elles

affleurent le plus souvent suite à de forts démaigrissements des plages lors des tempêtes hivernales, mettant ainsi en évidence ces dépôts sous-jacents reliques (Auzel & Bourcart, 1950). Ces dépôts tourbeux littoraux forment de grands bancs noirâtres plus ou moins recouverts de sable sur l'estran. Les principaux gisements de tourbes littorales<sup>1</sup> le long des côtes du Calvados sont d'est en ouest (*fig. IV-3*):

- 1) la plage de Criquebœuf: tourbe brun-noir contenant de nombreux troncs d'arbres de grandes tailles et des souches enracinées,
- 2) Villers-sur-Mer: à l'ouest, la moulière est située sur un banc de tourbe (présence de fragments d'os d'éléphant et de rhinocéros),
- 3) Luc-sur-Mer: au niveau du ruisseau de Luc-sur-Mer, tourbe et troncs d'arbres couchés,
- 4) Bernières-Courseulles (Brèches des Ormes): des bancs affleurent sur la plage (exploités en 1918-1921),
- 5) Gray-Saint-Côme de Fresné – Ver-sur-Mer: dépôts de tourbe les plus connus de la côte du Calvados qui affleurent jusqu'à -5 m CM,
- 6) St-Laurent-sur-Mer et Grandcamp: petits gisements peu connus et rarement découverts.

Les principales conclusions concernant les affleurements tourbeux observés sur deux sites, celui de Saint-Côme de Fresné – Asnelles et de Luc-sur-Mer sont présentées en annexe 4 du manuscrit.



**Figure IV-3.** Localisation des affleurements de tourbe sur le domaine littoral de la Baie de Seine.

<sup>1</sup> Une synthèse sur les tourbes dans le Calvados au Nord de Caen a été publiée par Bassompierre en 1944. Cette étude avait été demandée par les services de la préfecture du Calvados en prévision d'une pénurie de charbon en hiver 1940 suite au blocus et à l'occupation allemande. En effet, ces tourbières avaient été exploitées pour une utilisation comme combustible de chauffage et engrais entre 1917-1918 à Asnelles, Bernières et Courseulles, et en 1920-21 à la limite ouest de Langrune (6 700 tonnes extraites, exploitation "La Tourbe Marine").

### 2.3 Zone subtidale: les fonds marins reliques au large de Cabourg

Les premiers témoignages concernant la présence de sédiments reliques au large du littoral du Calvados et de l'embouchure de la Dives datent de 1977. Les carottages avaient permis de mettre en évidence, sur une épaisseur de 2,7 mètres maximum, une séquence sédimentaire principalement constituée d'argiles grises homogènes et de sables peu carbonatés (20 à 22 %) associés parfois à des dépôts tourbeux (*fig. IV-4*). A l'époque, cette formation a été attribuée au Boréal par analogie avec les dépôts de tourbe de l'estuaire de la Seine situés à des profondeurs voisines (-12 m CM en Baie et -24 à -14 m CM dans l'estuaire, Lefebvre *et al.*, 1974; Lefebvre, 1977a, b). Les carottes concernées présentaient la succession de faciès sédimentaires suivante:

- 1) à la base, un faciès de vase sableuse (10 à 20 % de  $\text{CaCO}_3$ ) riche en débris végétaux séparé de la vase homogène par des lits de tourbe (6 à 10 % de  $\text{CaCO}_3$ ) ou des passées riches en hydrobies,
- 2) une vase grise homogène (21 à 28 % de  $\text{CaCO}_3$ ),
- 3) le sédiment actuel composé de sable coquillier ou de sable vaseux lité sur 20 à 30 cm.

Avoine (1981, 1994) montre que ces sédiments reliques sont soit à l'affleurement, en particulier au large de la Dives, soit sous une faible couverture sédimentaire entre Cabourg et Trouville (*fig. II-10, p. 73*). La prospection géophysique par sismique haute-résolution et par sonar à balayage latéral réalisée dans les années 1980 (Auffret & d'Ozouville, 1986) a permis de préciser ces observations. Entre l'embouchure de la Dives et celle de la Seine, les données sismiques ont révélé la présence, sur de larges surfaces, de gaz dans les sédiments sous-jacents formant un écran à la pénétration des ondes sismiques. Ces gaz sont associés aux sédiments organiques et tourbeux qui constituent certains niveaux du remplissage holocène de la Baie de Seine sud-orientale. Cette prospection sismique a également permis de déterminer l'épaisseur des dépôts de remplissage et de mettre ainsi en évidence le réseau de paléovallées correspondant au prolongement en mer des cours d'eau avec leurs nombreux paléoméandres (*fig. IV-5*, la Seine, l'Orne, la Dives et la Touques) (Auffret & d'Ozouville, 1986). La transgression flandrienne a comblé les paléovallées de ces différents exutoires et le seul indice actuel directement visible de ces anciennes incisions est la dépression bathymétrique appelée le Parfond, située face à l'embouchure de la Seine.

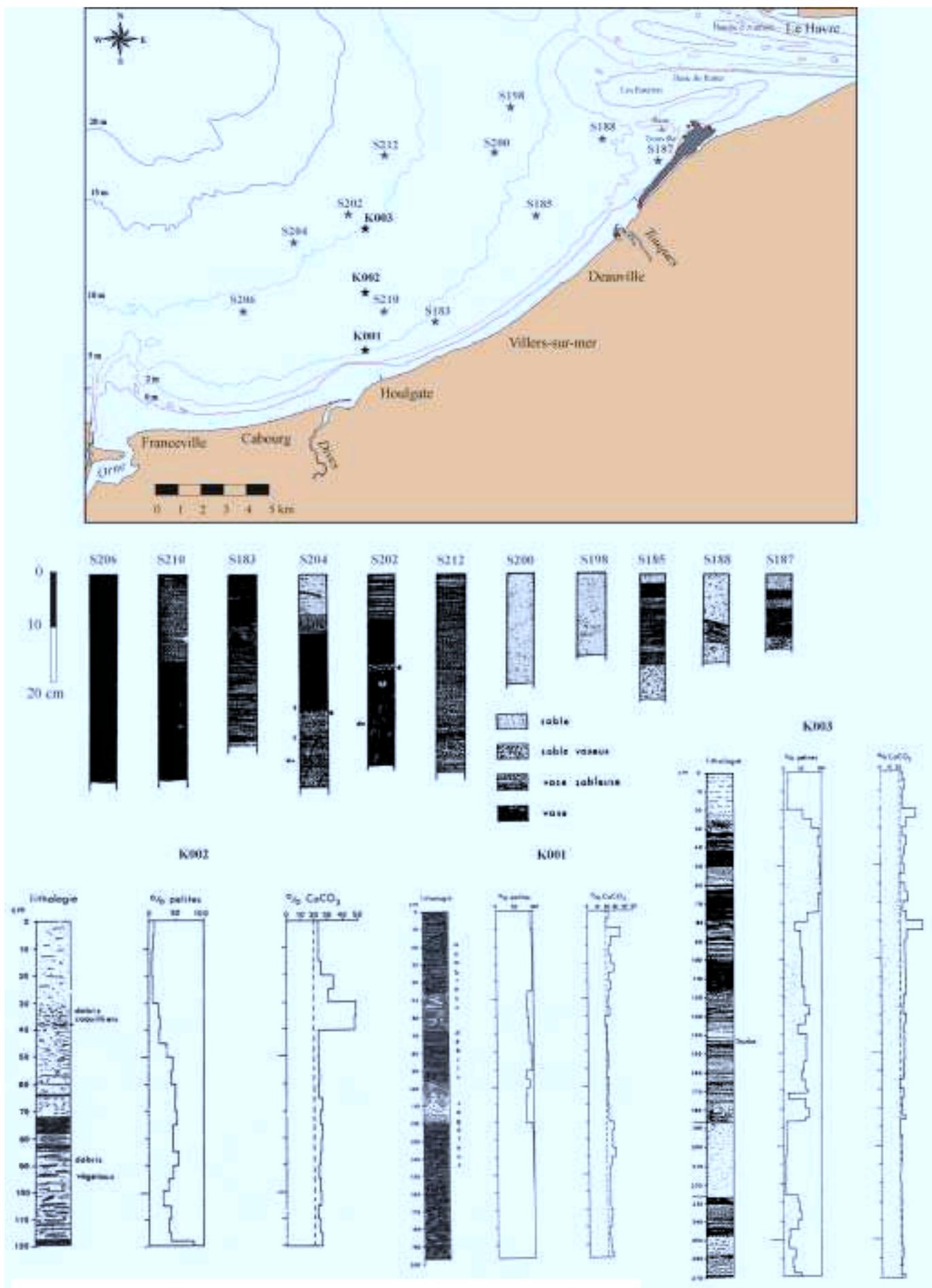
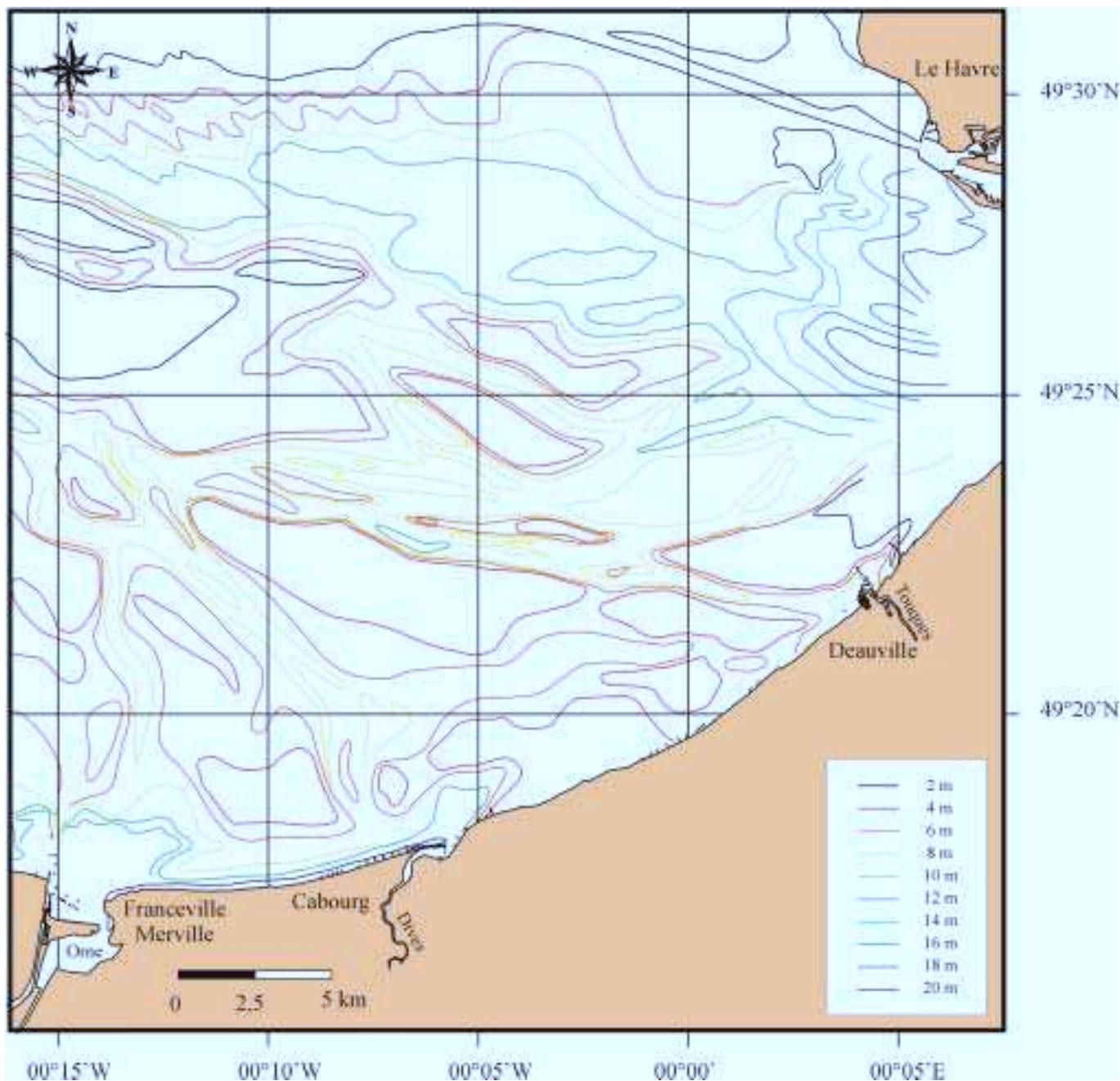


Figure IV-4. Localisation des carottes courtes (notées SXXX) et Küllenbergs (K002, K002 et K003) réalisées en Baie de Seine sud-orientale entre 1970 et 1980. Log des carottes correspondants (Avoine, 1981, 1994).



**Figure IV-5.** Carte des isopaques des dépôts holocènes en Baie de Seine sud-orientale (d'après Auffret & d'Ozouville, 1986).

### 3. Histoire du remplissage holocène de la Baie de Seine sud-orientale: nouveaux résultats

#### 3.1 Missions de carottages longs en 2000 et 2001

Deux missions de carottages ont été réalisées en Baie de Seine orientale lors des campagnes en mer VASTEDEBA en juin 2000 et 2001. La première (VASTEDEBA II) a permis d'obtenir 11 carottes à l'aide d'un carottier Küllenberg (fig. IV-6). Cependant, la compacité des

fonds limitait l'enfoncement de ce carottier à moins de 2 m. Les carottages en juin 2001 ont donc été effectués à l'aide d'un vibrocarottier (matériel GENAVIR/IFREMER, collaboration DEL-IFREMER<sup>2</sup>), permettant d'améliorer la pénétration. Les carottes ainsi obtenues ont atteint jusqu'à 4,20 m (mission VASTEDEBA III, *figs. IV-6 et V-7*). Toutefois, seules 4 des 16 carottes dépassent 3 m (*tabl. IV-1*) du fait des très faibles hauteurs d'eau des sites prospectés mais aussi de la présence d'argiles très compactes, de galets et rognons de silex.

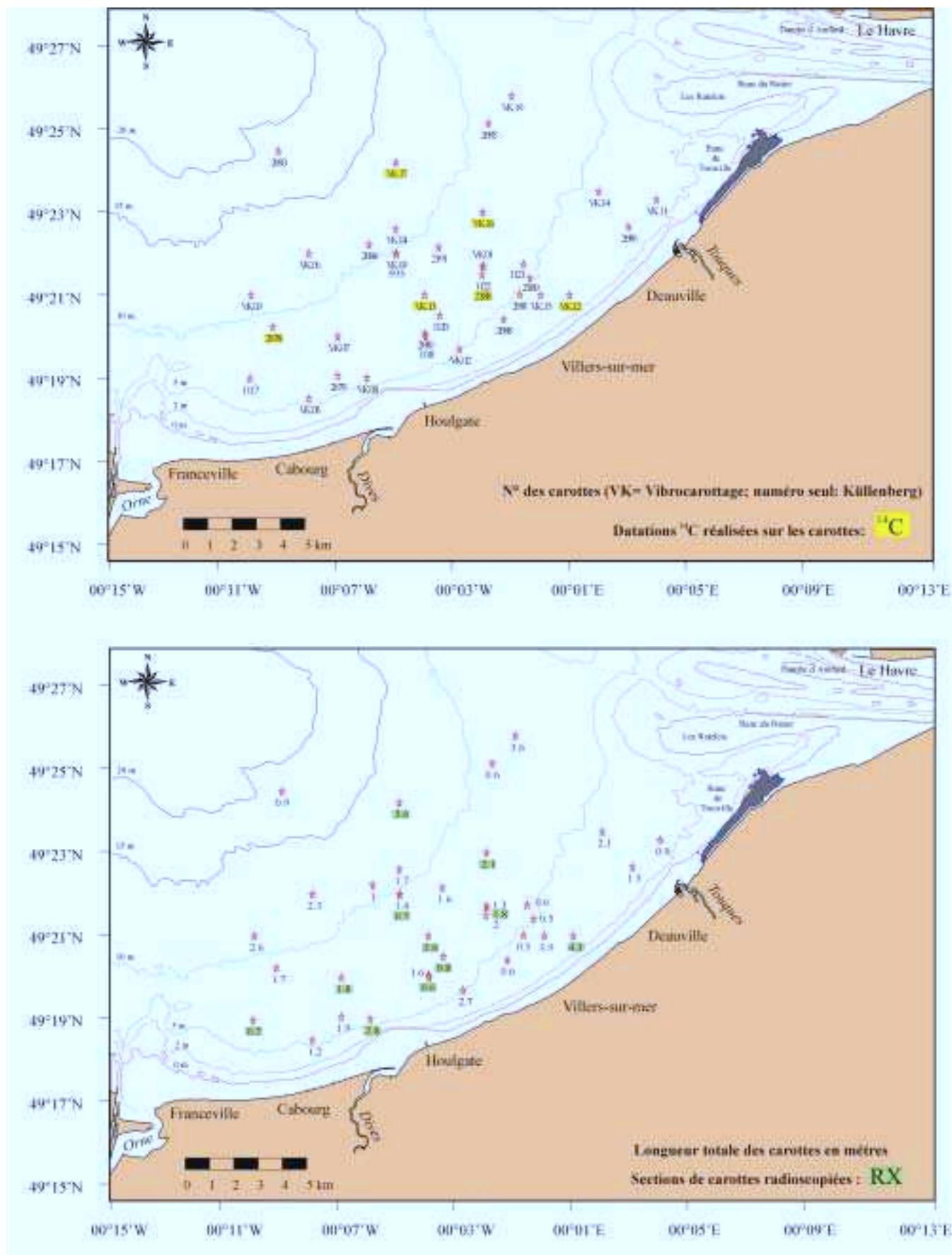


**Figure IV-7.** Vibrocarottier embarqué à bord du N/O Thalia lors de la mission VASTEDEBA III.

Sites (VK)	Latitude			Longitude			Longueur des carottes (m)
1	49	21,700	N	00°	2,000	W	1,30
2	49	19,692	N	00°	2,796	W	2,71
3	49	21,023	N	00°	10,035	W	2,55
4	49	22,600	N	00°	5,000	W	1,72
5	49	21,994	N	00°	7,958	W	1,21
6	49	18,483	N	00°	7,989	W	2,33
7	49	19,975	N	00°	6,958	W	1,77
8	49	18,866	N	00°	6,124	W	2,83
9	49	21,990	N	00°	4,953	W	1,42
11	49	23,300	N	00°	4,000	E	0,90
12	49	21,002	N	00°	1,001	E	4,20
13	49	21,000	N	00°	3,960	W	3,60
15	49	24,000	N	00°	0,000	E	3,85
16	49	23,000	N	00°	2,000	W	2,15
17	49	24,221	N	00°	5,149	W	3,64
19	49	25,800	N	00°	1,000	W	2,10

**Tableau IV-1.** Localisation des points de vibrocarottage réalisés pendant la campagne VASTEDEBA III et longueur des carottes effectuées. Longitude et latitude données en système de coordonnées Europe 50. Carottes annotées VK suivi du numéro du site sur la figure IV-6.

<sup>2</sup> Département Ecologie Littorale, Direction Environnement et Aménagement du Littoral, IFREMER, Brest.



**Figure IV-6.** Localisation des carottages réalisés depuis 1999 sur le secteur de la Baie de Seine sud-orientale. Certaines niveaux des carottes surlignées en jaune ont été datés par <sup>14</sup>C et des carottes entières ou certaines sections des carottes surlignées en vert ont été radiocardiées (système SCOPIX, Bordeaux).

### 3.2 Résultats: reconstitution lithostratigraphique du remplissage holocène de la Baie de Seine sur le secteur d'étude

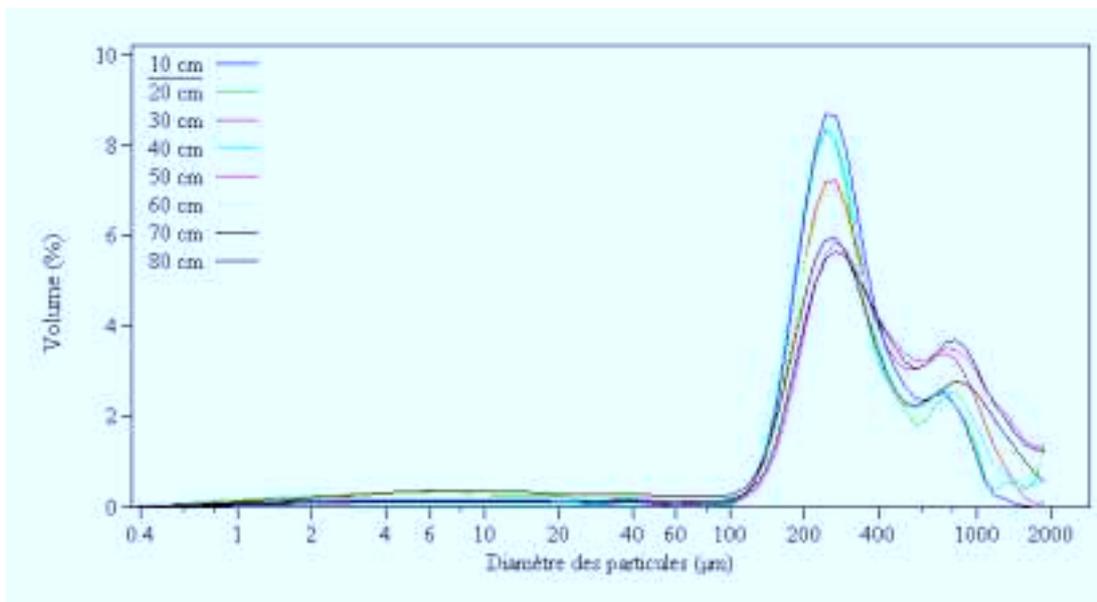
Si la position des dépôts reliques en Baie de Seine sud-orientale a rapidement pu être précisée grâce au sonar à balayage latéral (*cf. chapitre III*) et à des carottages courts (Reineck) pour les dépôts subaffleurants, les carottes longues nous ont permis de retracer l'historique de la sédimentation holocène. Il faut noter que malgré les longueurs assez conséquentes de certaines carottes (plus de 4 m) le substratum mésozoïque n'a jamais été atteint. Toutefois, plusieurs indices (e.g. difficultés de pénétration du carottier, nodules carbonatés) en suggèrent la proximité à la base des carottes les plus longues.

#### 3.2.1 Les dépôts sableux subtidaux

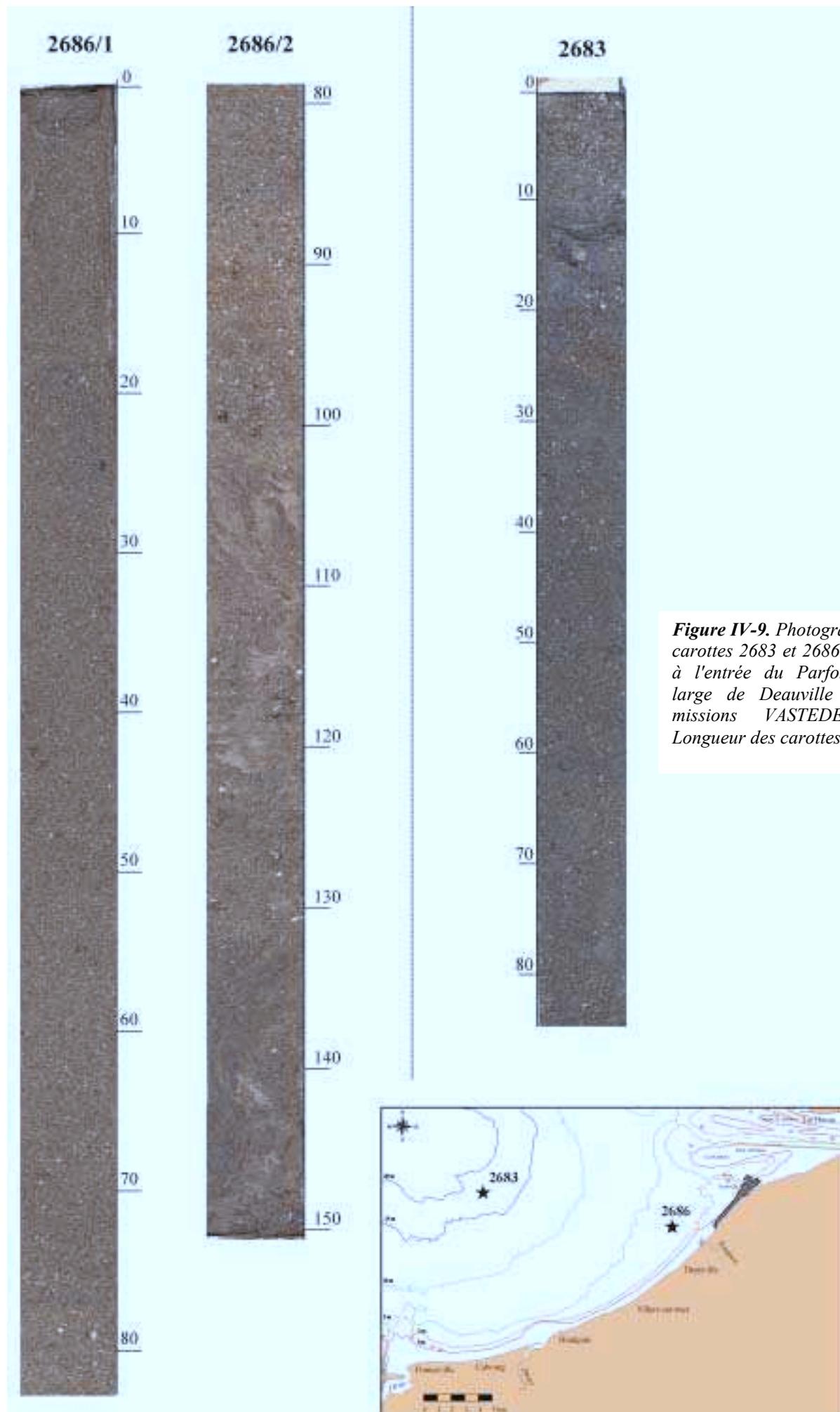
##### 3.2.1.1 Résultats

Les carottes présentant des dépôts sableux sur plusieurs mètres sont rares dans la zone d'étude de la Baie de Seine sud-orientale puisque l'ensemble du secteur est dominé par un remplissage sablo-argileux et argileux. Toutefois, parmi l'ensemble des carottes récoltées (*fig. IV-6*), on peut distinguer deux zones sableuses situées de part et d'autre des argiles fossiles vers le Parfond (bathymétrie supérieure à 15 m) et en domaine plus côtier face à Deauville et les bancs d'embouchure de la Seine.

Une carotte a été prélevée au niveau du Parfond par une profondeur de -18 m (n°2683, *fig. IV-6*). Le faciès rencontré dans cette carotte est très homogène, constitué exclusivement d'un sable fin à moyen à nombreux débris coquilliers. La moyenne granulométrique est comprise entre 245 et 269  $\mu\text{m}$  (*figs. IV-8 et IV-9*). Ces caractéristiques granulométriques sont analogues à celles des sables actuels des fonds de la Baie de Seine (du moins pour ces 80 premiers cm).



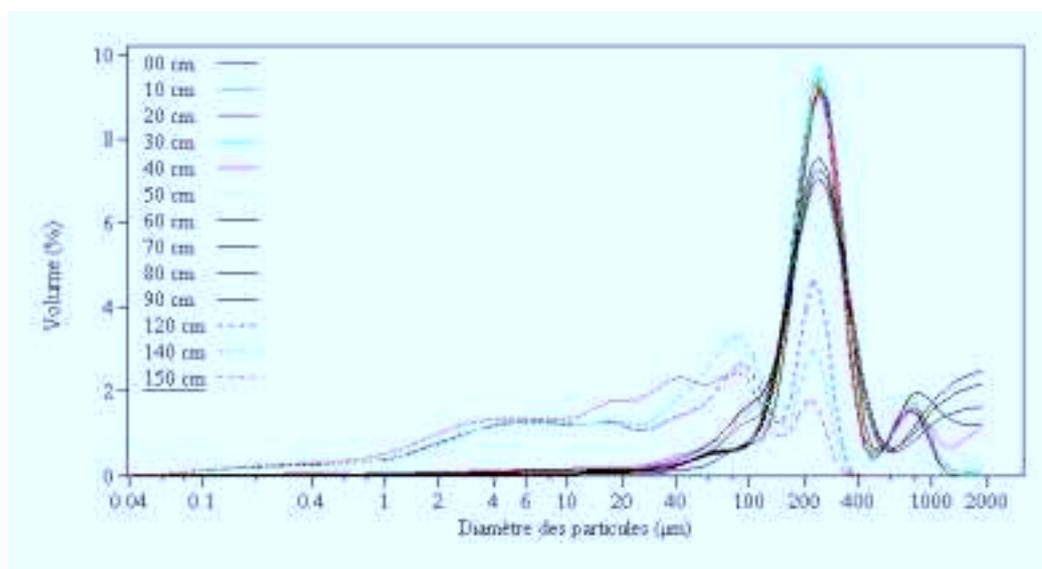
**Figure IV-8.**  
Granulométrie  
des échantillons  
prélevés sur la  
carotte 2683.



*Figure IV-9. Photographies des carottes 2683 et 2686 prélevées à l'entrée du Parfond et au large de Deauville lors des missions VASTEDEBA III. Longueur des carottes en cm.*

La deuxième carotte (2686) a été prélevée sur le secteur de Deauville-Trouville par -4 m CM de profondeur, région connue comme étant une zone d'engraissement active par du matériel sableux, sous la dérive littorale W-E. Cette dernière déplace les sédiments sableux vers l'embouchure de la Seine (Volmat, 1929; Auzel & Bourcart, 1950). La carotte 2686 montre un faciès sableux très homogène (*figs. IV-09 et IV-10*) dont le mode principal est situé à 245  $\mu\text{m}$  pour le premier mètre superficiel. Mais à partir d'1,1 m et jusqu'à la base de la carotte, le sédiment s'affine légèrement passant à 223  $\mu\text{m}$  avec des intercalations de niveaux plus fins: modes granulométriques autour de 88, 42, 18 et 6  $\mu\text{m}$  (*fig. IV-10*).

**Figure IV-10.**  
Granulométrie  
des échantillons  
prélevés à pas  
constant de 10  
cm sur la carotte  
2686.



### 3.2.1.2 Interprétation de la carotte 2686

Le premier mètre correspond aux sédiments actuels des fonds subtidaux au large de Deauville: un sable faiblement coquillier pauvre en fraction fine et au mode granulométrique constant de 245  $\mu\text{m}$ . Par contre, les sédiments sous-jacents révèlent des niveaux vaseux dans un sable plus fin (223  $\mu\text{m}$ ) certainement mis en place dans un contexte hydrodynamique différent, qui en a permis le dépôt et la préservation. Peut-on alors avoir une idée de l'âge de ces sédiments ? En fait, la carte sédimentologique la plus ancienne des archives du SHOM (*fig. II-3, p. 63*) montre en 1834 une sédimentation vaseuse importante au large de Deauville centrée dans une dépression bathymétrique. Son comblement complet dès 1880 suggère une préservation d'une partie de ces dépôts, peut-être ceux retrouvés dans la carotte à partir de 1,1 m. Le taux de sédimentation ainsi calculé serait de 0,7-0,9  $\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$ . Cette conclusion ne peut être appuyée par des mesures de  $^{210}\text{Pb}$  car en Baie de Seine orientale, ce marqueur radiochimique étant impossible à utiliser du fait des rejets de phosphogypse qui altèrent les résultats radiochronologiques (communication personnelle, D. Boust).

### 3.2.2 Séquence des dépôts holocènes argileux

#### 3.2.2.1 Faciès, structures et interprétations des dépôts sédimentaires

Les sédiments reliques subtidaux affleurants sont facilement reconnaissables par leur couleur gris bleuté (5Y 6 à 5Y 4 / 1, référence des couleurs d'après la charte Munsell) et par leur forte cohésion qui contraste avec la couverture sédimentaire actuelle constituée de sables fins à moyens envasés. Les carottes montrent dans leur ensemble des variations importantes de faciès et de structures pouvant être corrélées d'une carotte à une autre. Les carottes, prélevées de manière à couvrir l'ensemble de la Baie de Seine sud-orientale, ont permis de distinguer 3 unités lithostratigraphiques.

**L'unité 1** est systématiquement présente à la base des plus longues carottes et de celles prélevées plus au large. Son épaisseur est souvent limitée à moins de 50 cm, sauf dans la carotte VK17 où elle atteint 2,40 m. Elle se caractérise par un faciès très riche en matière organique végétale ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = -27,9 \text{ ‰}$ ) avec de nombreux morceaux de bois décomposés. A la base de cette unité se trouve une argile blanche (couleur 5Y 7/1), de moyenne granulométrie comprise entre 10 et 15  $\mu\text{m}$ , contenant des nodules de calcaire millimétriques et des morceaux de silex (*fig. IV-11*, VK13 ① niv. 310-350 cm) et qui passe progressivement à des niveaux très tourbeux dans sa partie supérieure (couleur 10 YR 2/2). Dans ces niveaux tourbeux, les radiographies aux RX permettent de discerner de nombreux filaments opaques, de quelques centimètres de long et quelques dixièmes de millimètres de diamètre (*fig. IV-11*, VK12 ② niv. 410-417 cm). Ces filaments diagénétiques sont apparus par pyritisation lors de la libération du soufre en présence abondante de matière organique. Ces sulfures se sont développés sous des conditions environnementales de mauvaise oxygénation de "type marécage" en milieu confiné.

**L'unité 2** est constituée d'une argile homogène contenant peu de structures sédimentaires et dont l'épaisseur peut atteindre 1 m. Sa couleur est typiquement gris bleuté (5Y 4/1). Elle est dominée par des radicules de végétaux, principalement des roseaux qui s'enchevêtrent, ainsi que de nombreux niveaux de débris ligneux (*fig. IV-11*, 1120 ③ niv. 41-80 cm, VK12 ③ niv. 215-245 cm et VK13 ③b niv. 81-96 cm). La moyenne granulométrique n'excède pas 10  $\mu\text{m}$  (silt fin et moyen) et la bioturbation est parfois abondante sous la forme de pistes et terriers qui constituent des réseaux complexes de tubes de quelques mm à cm de diamètre (*fig. IV-11*, VK12 ③ niv. 215-245 cm). Ce niveau homogène ne contient que de très rares valves de petits lamellibranches. Quelques rares mollusques (*Cerastoderma edule*) apparaissent cependant, peut-être déplacés (*fig. IV-11*, VK13 ③b niv. 87 cm). Les sédiments qui composent l'unité 2 sont typiques de dépôts mis en place dans un ancien marais maritime; les niveaux sableux assez importants (60 cm et VK13 et 35 cm 2188, *fig. IV-13*, p. 246) pouvant parfois apparaître à l'intérieur de cette argile, sont alors interprétés comme le résultat d'évènements d'overwash (e.g. lors des tempêtes) avec des arrivées brutales de sédiments venant recouvrir l'ancien marais.

Au sommet de cette unité, ces dépôts sont souvent ponctués de terriers (*fig. IV-11*, VK17<sup>5</sup> couteau, *Ensis ensis*, niv. 118-120 cm) et de quelques niveaux sableux très coquilliers (*fig. IV-11*, 1120<sup>6</sup> niv. 50 cm).

---

**Figure IV-11.** Extraits de radiographies, de sections de carottes prélevés dans les dépôts holocènes submergés de la Baie de Seine sud-orientale, représentatifs des différentes unités lithostratigraphiques (clichés positifs, système SCOPIX, Université de Bordeaux).

### Unité 1:

VK13<sup>1</sup> niv. 310-350 cm: argile blanche à nodules de calcaire et morceaux de silex

VK12<sup>2</sup> niv. 410-417 cm: pyrite, sous forme de filaments diagénétiques, caractéristique d'un milieu confiné (marais)

### Unité 2:

1120<sup>6</sup> niv. 41-80 cm, VK12<sup>3</sup> niv. 215-245 cm et VK13<sup>3b</sup> niv. 81-96 cm: niveaux de débris ligneux dans une argile

VK12<sup>3</sup> niv. 215-245 cm: réseaux complexes de pistes et terriers de quelques mm à cm de diamètre dans une argile

VK13<sup>3b</sup> niv. 87 cm: valves de *Cerastoderma edule*

1120<sup>6</sup> niv. 50 cm: niveau sableux très coquillier

VK17<sup>5</sup> niv. 118-120 cm: coquille de couteau, *Ensis ensis*

### Unité 3

VK17<sup>7</sup> VK16<sup>8</sup>, VK16<sup>9</sup> et VK13<sup>10</sup>: intercalations de lamines horizontales ou très faiblement inclinées, d'épaisseur millimétrique à centimétrique, et de nature respectivement silteuse et sableuse

VK16<sup>8</sup> niv. 66-68 cm, niv. 93-98 cm, niv. 112-114 cm et VK16<sup>9</sup> niv. 29-31 cm: lits de 10 cm d'épaisseur maximum de sédiments grossiers: sables fins à moyens coquilliers

VK16<sup>9</sup> niv. 10-53 cm: lamines parallèles planes

VK17<sup>7</sup> niv. 52-70 cm: lamines parallèles subplanes

VK16<sup>8</sup> niv. 117 cm: litages lenticulaires

VK12<sup>4</sup> niv. 190 cm, VK17<sup>5</sup> niv. 118 cm et 1120<sup>6</sup> niv. 41 cm: surface d'érosion

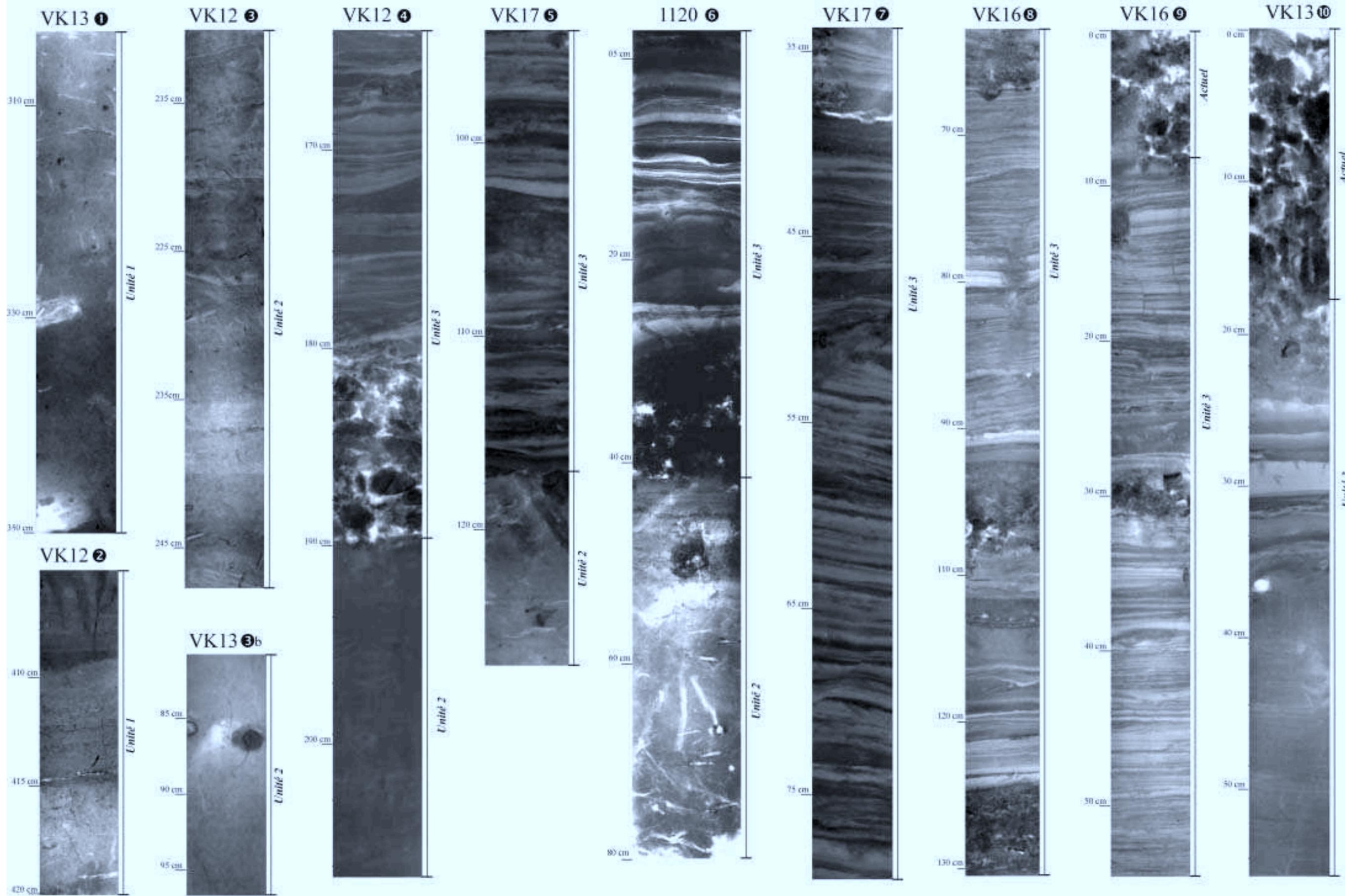
1120<sup>6</sup> niv. 12 cm: litage ondulé de vagues (*wavy bedding*)

VK 16<sup>8</sup> niv. 68, niv. 76-85 et VK16<sup>9</sup> niv. 11-13 cm: bioturbation, terriers centimétriques à remplissage silto-sableux

1120<sup>6</sup> niv. 27-30 cm: tubes de *Pectinaria Keroni*

VK16<sup>9</sup> niv. 10-25 cm: fentes de dessiccation, indices de l'exondation de ces dépôts en domaine intertidal

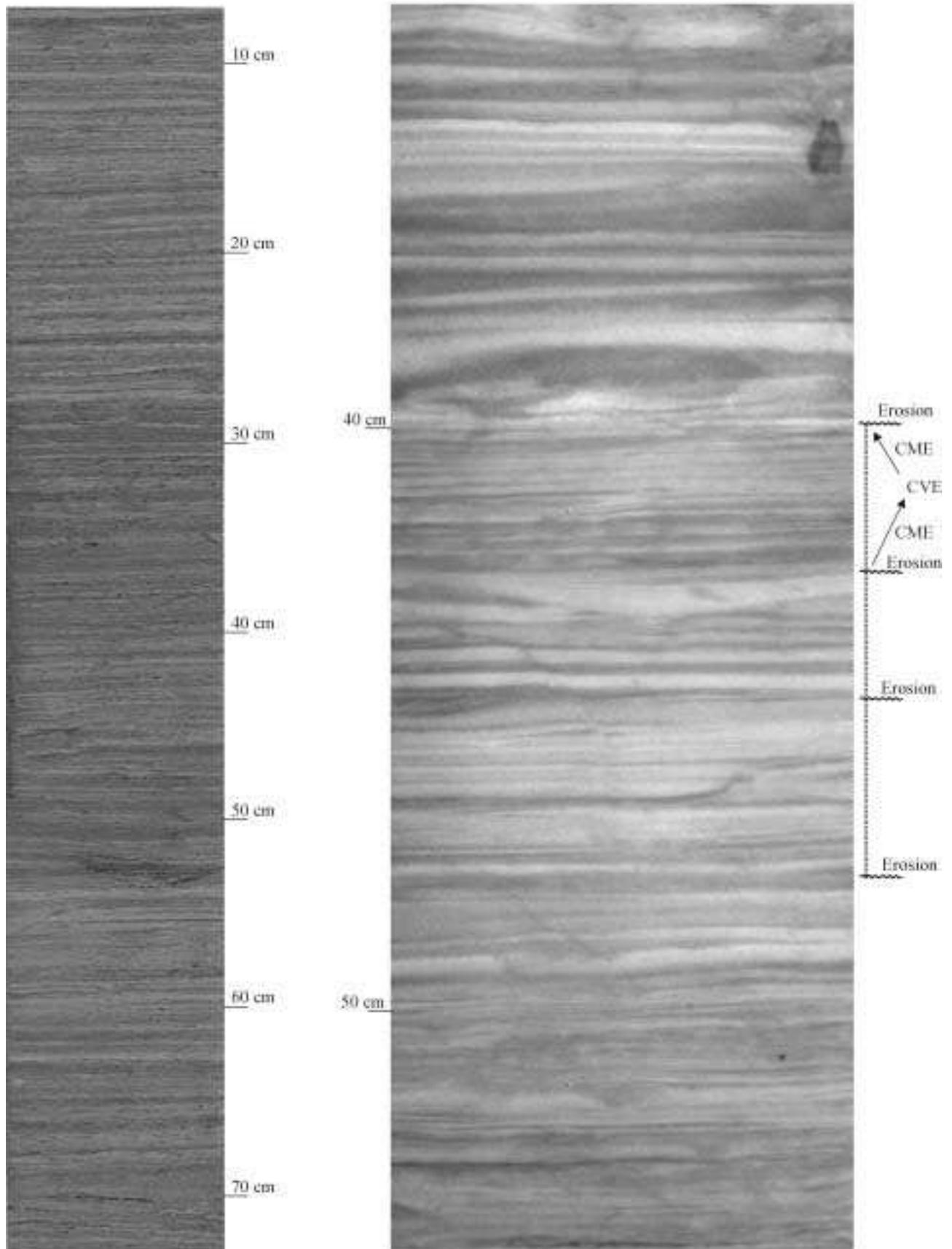
VK12<sup>4</sup> niv. 180-190 cm: coquilles de moules entières



L'unité 3, au sommet de la séquence, est caractérisée par un ensemble composé de nombreuses intercalations de lamines, horizontales ou très faiblement inclinées, d'épaisseur millimétrique à centimétrique, de nature alternativement silteuse et sableuse (*fig. IV-11*, VK17⑦ VK16③, VK16⑨ et VK13⑩). L'épaisseur de l'unité 3 peut dépasser 2 m composés de niveaux à lamines parallèles planes (*fig. IV-11*, VK16⑨ niv. 10-53 cm) ou subplanes (*fig. IV-11*, VK17⑦ niv. 52-70 cm). Des passées de sédiments plus grossiers, sables fins à moyens coquilliers, s'intercalent dans cette unité sous la forme de lits de 10 cm d'épaisseur maximum (*fig. IV-11*, VK16③ niv. 66-68 cm, niv. 93-98 cm, niv. 112-114 cm et VK16⑨ niv. 29-31 cm). L'unité 3 est presque systématiquement sous-jacente à la couverture sédimentaire sableuse actuelle. La limite entre l'unité 2 et 3 est très souvent marquée par une surface d'érosion très nette (*fig. IV-11*, VK12④ niv. 178 cm, VK17⑤ niv. 108 cm et 1120⑥ niv. 41 cm). Le litage tidal observé dans l'unité 3 témoigne d'une mise en place dans un environnement intertidal à subtidal à caractère estuarien: rythmites tidales planes, litages lenticulaires, lamines entrecroisées, fentes de dessiccation et terriers. Ces différentes structures ont les caractéristiques suivantes:

- les tidalites sont de type amalgamées (e.g. Tessier, 1992). Les cycles semi-lunaires ne sont pas complets, généralement tronqués (*fig. IV-12*) soit par les cycles de marée suivants, soit par leur remaniement ou la remise en suspension par les vagues. On notera leur similitude avec les structures de la vasière Nord actuelle de l'embouchure de la Seine (Lesourd, 2000),
- de rares litages lenticulaires (VK16③ niv. 117 cm),
- des lamines entrecroisées sont visibles sur certaines carottes (*fig. IV-11*, 1120⑥ niv. 12 cm),
- la bioturbation est caractérisée par des terriers centimétriques à remplissage silto-sableux qui viennent s'insinuer dans les lamines (*fig. IV-11*, VK16③ niv. 68, niv. 76-85 et VK16⑨ niv. 11-13 cm) mais aussi par des *Pectinaria Keroni* (tubes arénacés coniques) qui se distinguent bien d'un encaissant vaseux (*fig. IV-11*, 1120⑥ niv. 27-30 cm),
- des fentes de dessiccation contemporaines des dépôts sont également visibles en sommet d'unité (*fig. IV-11*, VK16⑨ niv. 10-25 cm). Elles sont des indices de l'exondation de ces dépôts en domaine intertidal.

Cette unité contient peu d'accumulations de matériel coquillier, pour la plupart autochtones et parfois monospécifique, mais on note toutefois des niveaux d'individus entiers de moules (*fig. IV-11*, VK12④ niv. 180-190 cm). Les espèces échantillonnées sont: *Albra alba*, *Cerastoderma edule*, *Macoma balthica*, *Mytilus edulis* et *Donax vittatus*. Certaines de ces espèces donnent des indications précises sur le biotope, à l'image des donaces qui vivent exclusivement à la limite du domaine inférieur intertidal, observés en position de vie dans la carotte VK12 (40-65 cm de profondeur dans la carotte). Les accumulations de débris coquilliers ou de coquilles entières sont présentes soit à la base de cette unité 3, soit à son sommet où des pétricoles (*Petricola pholadiformis*) et des becs de jar actuels (*Mya arenaria*) viennent perforer ces sédiments reliques fortement compactés.



**Figure IV-12.** Deux parties de carottes montrant un litage tidal de type amalgamé. Les cycles de morte-eau/vive-eau (CME/CVE) ne sont pas complets, ils sont tronqués. A gauche: photographie de la carotte 2679. A gauche: radiographie positive de détail de la carotte VK16 entre 33 et 54 cm Les lamines sombres identifient les niveaux de sables.

### 3.2.2.2 Données radiochronologiques

La qualité du matériel tourbeux, des morceaux de bois et des coquilles prélevés dans ces carottes a permis de procéder à une série de datations au carbone 14. Cependant, les niveaux susceptibles de contenir du matériel nécessaire à la datation se situent le plus souvent au sein de faciès similaires d'une même unité; de ce fait, l'unité 2 n'a pu être datée qu'une seule fois, faute de matériel suffisant. Néanmoins, une datation AMS (Accelerator Mass Spectrometry) nécessitant peu de matériel (15-100 mg) a permis de dater la base de l'une des carottes les plus longues (VK12). Les datations ont donc été réalisées sur 6 carottes différentes et 2 d'entre elles (VK17 et VK12, *fig. IV-6*) sont datées en 3 niveaux différents (*tabl. IV-2*).

L'âge le plus ancien obtenu est de  $9\,250 \pm 100$  ans BP à la base de l'**unité 1** (VK17 à 121-135 cm de la surface). Un âge similaire de  $9\,070 \pm 90$  ans BP est également obtenu sur cette même carotte, à une profondeur beaucoup plus importante de 322-329 cm (*fig. IV-13, tabl. IV-2*). Cet âge correspond à la période Préboréal de l'Holocène. Deux résultats de datations se situent aussi dans une échelle de temps comparable, du début du Boréal:  $8\,870 \pm 100$  ans BP et  $8\,680 \pm 120$  ans BP (VK13 et 2678, *tabl. IV-2*). Les argiles compactes homogènes de l'**unité 2** n'ont pu délivrer de matériel qu'en un seul niveau très coquillier, en partie sommital. Ce niveau peut être assimilé au premier signe de l'invasion marine dans les dépôts étudiés; cet épisode imputable à des dépôts de débordement lors de tempêtes (overwash) est daté à  $6\,820 \pm 100$  ans BP (*fig. IV-13, tabl. IV-2*).

Deux datations (carottes VK17 et 2188) ont été obtenues sur un matériel sableux coquillier qui se met en place sur la surface d'érosion nette entre l'**unité 2 et 3** (*fig. IV-13, tabl. IV-2*). Les dates  $^{14}\text{C}$  sur ce matériel coquillier littoral montrent que l'invasion marine du site lors de la transgression flandrienne s'effectue ici à  $6\,530 \pm 100$  et  $6\,350 \pm 110$  ans BP. Ces âges sont en accord avec les dates proposées pour la remontée du niveau marin en Baie de Seine (Larsonneur, 1971): il y a 7 000 ans BP le niveau était plus bas d'environ 10 m par rapport au zéro marin actuel (Morzadec-Kerfourn & Delibrias, 1972).

Dans l'**unité 3**, peu de niveaux permettaient de réaliser des datations  $^{14}\text{C}$ . Cependant, dans la carotte VK12, à 1,9 m de la surface, un niveau composé majoritairement de coquilles de moules brisées a donné un âge de  $4\,010 \pm 100$  ans BP (*fig. IV-13, tabl. IV-3*). La datation la plus récente de  $1\,260 \pm 60$  ans BP provient de coquilles de donaces (*Donax vittatus*) non cassées et non remaniées, sous seulement 40-65 cm de sédiment par -3 m CM (*fig. IV-13, tabl. IV-2*). Ces mollusques sont de bons marqueurs de milieux, vivant exclusivement en domaine intertidal inférieur (proches du 0 CM) sur les plages sableuses. Elles ont été retrouvées en position de vie dans la carotte VK12 et permettent ainsi d'évaluer la limite intertidale inférieure autour de l'isobathe actuelle de -3 m CM il y a 1 200-1 300 ans BP.

Carottes	Bathymétrie (m)	Matériel daté	Référence du laboratoire	Profondeur dans la carotte (cm)	Age BP <sup>14</sup> C
2188	6	Coquilles	UL-2248	95-100	6 530 ± 100
2678	9	Tourbe	UL-2250	100-144	8 870 ± 100
VK 12	3	Coquilles de donaces	UL-2458	40-65	1 260 ± 60
VK 12	3	Coquilles de moules	UL-2434	181-194	4 010 ± 100
VK 12*	3	Tourbe	Beta-165982	420-430	7 990 ± 40
VK 13	7,5	Bois	UL-2441	305-309	8 680 ± 120
VK 16	7,5	Coquilles	UL-2447	145-150	6 820 ± 100
VK 17	13	Coquilles	UL-2433	81-85	6 360 ± 110
VK 17	13	Tourbe	UL-2432	121-135	9 250 ± 100
VK 17	13	Bois	UL-2431	322-329	9 070 ± 90

\* AMS analysis  $^{13}\text{C}/\text{C}^{12} = -27,9 \text{ ‰}$

**Tableau IV-2.** Données radiochronologiques obtenues sur les carottes de la Baie de Seine sud-orientale. Les analyses radiochronologiques ont été réalisées au Centre d'études Nordiques de l'Université de Laval, Québec Canada, à l'exception de la datation Beta-165982 effectuée par Beta Analytic Inc. à Miami Floride, USA.

En résumé, ces datations fournissent les premières données de datation absolue des argiles reliques des fonds subtidaux de la Baie de Seine sud-orientale. Les âges obtenus sur l'ensemble des carottes s'échelonnent entre 9 250 et 1 260 ans BP et se limitent donc naturellement à la période de la transgression holocène. La datation de 6 carottes différentes aide à corréliser les différentes unités lithostratigraphiques (*fig. IV-13*)

### 3.2.2.3 Teneurs en carbonates

Les teneurs en carbonates ont été mesurées à l'aide du calcimètre Bernard sur plus de 80 échantillons prélevés dans les différentes unités des argiles fossiles. Les variations des teneurs en  $\text{CaCO}_3$  de ces sédiments reliques sont en accord avec les unités définies précédemment. Les valeurs maximales, comprises entre 35 et 50%, sont toujours atteintes au sommet des carottes et correspondent à la sédimentation actuelle constituée de sable fin à moyen coquillier.

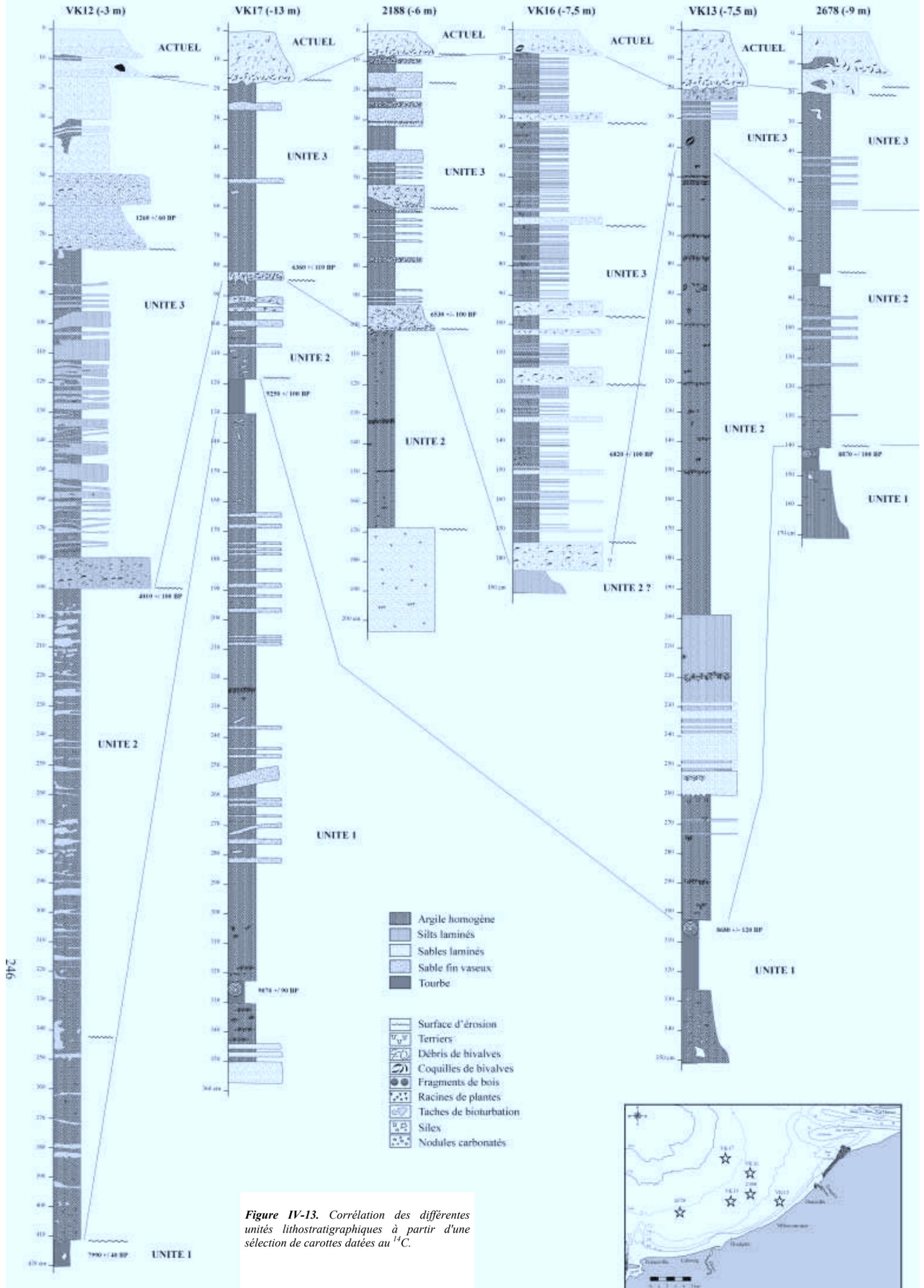


Figure IV-13. Corrélation des différentes unités lithostratigraphiques à partir d'une sélection de carottes datées au  $^{14}\text{C}$ .

Le taux de carbonates contenus dans l'**unité 1** est généralement très faible, inférieur à 10 %, avec la nature tourbeuse du matériel. Il diminue de manière graduelle de bas en haut: 25% à la base de la carotte et 0,5 % dans les niveaux très tourbeux du sommet (VK13, niv. 300-350, *fig. IV-14*). Les taux élevés de carbonates à la base de la carotte VK13 sont en relation avec la présence d'une argile blanche contenant de nombreux nodules calcaires. De tels dépôts argileux (*fig. IV-2, p. 219*) ont déjà été signalés au niveau de forages réalisés dans le port du Havre (Guyader, 1977; Lefebvre, 1977a). Dans l'**unité 2**, le pourcentage en carbonates est très homogène autour de 20% (*fig. IV-14, VK06, niv 20-150*) mais peu ponctuellement descendre à 13% (*fig. IV-14, VK08, niv 200-250*). De telles valeurs avaient été notées par Avoine en 1980 sur des sédiments reliques similaires (*fig. IV-4, p. 222*). Lorsque le sédiment est bioturbé (VK12, niv 190-400 et VK17, niv. 160-375, *fig. IV-14*), les valeurs sont dans une fourchette supérieure, entre 23 à 26%. Malgré les lamines qui composent l'**unité 3**, les teneurs en carbonates sont assez constantes, entre 25 et 28% (*fig. IV-15, VK01, niv. 25-120 et VK08, niv. 20-140*). Elles dépassent rarement 30% à l'exception des intercalations de niveaux très coquilliers, avec des taux similaires à ceux des sables actuels (35-40%).

Ainsi, le taux de carbonates des 3 unités composant les sédiments reliques de la Baie de Seine sud-orientale peut être utilisé comme un critère de reconnaissance des dépôts reliques, avec un taux de  $\text{CaCO}_3$  systématiquement inférieur à 34 %. Il peut également constituer une aide à la caractérisation des différentes unités lithostratigraphiques. Cependant, la bioturbation qui affecte localement l'unité 2 modifie à la hausse ce taux, en le ramenant à des valeurs plus caractéristiques de l'unité 3. Les teneurs en carbonates doivent donc être utilisées avec précaution et couplées systématiquement avec les observations pour définir les unités.

#### 3.2.2.4 Teneurs en carbone organique

Les teneurs en carbone organique ont été mesurées sur les carottes prélevées lors des premières missions (VASTEDEBA II). Classiquement, les variations de ce taux sont inversement corrélées à la granulométrie du matériel, exprimée par sa moyenne (*fig. IV-16, p. 240*) ou par le pourcentage de la fraction fine (*fig. IV-17, p. 240*), ce que nous avons pu vérifier. Les mesures ont été réalisées sur la carotte 2678 qui traverse l'ensemble des unités précédemment décrites. Le taux de carbone organique s'établit autour de 1,5 à 2 % et augmente à 7% dans le niveau de tourbe (*fig. IV-16*). Ces valeurs mesurées dans les sédiments anciens sont plus élevées que celles rencontrées dans les échantillons de sédiments superficiels de la Baie de Seine sud-orientale. On constate également que le taux de carbone organique augmente progressivement dans les 30 premiers centimètres (*fig. IV-16*).

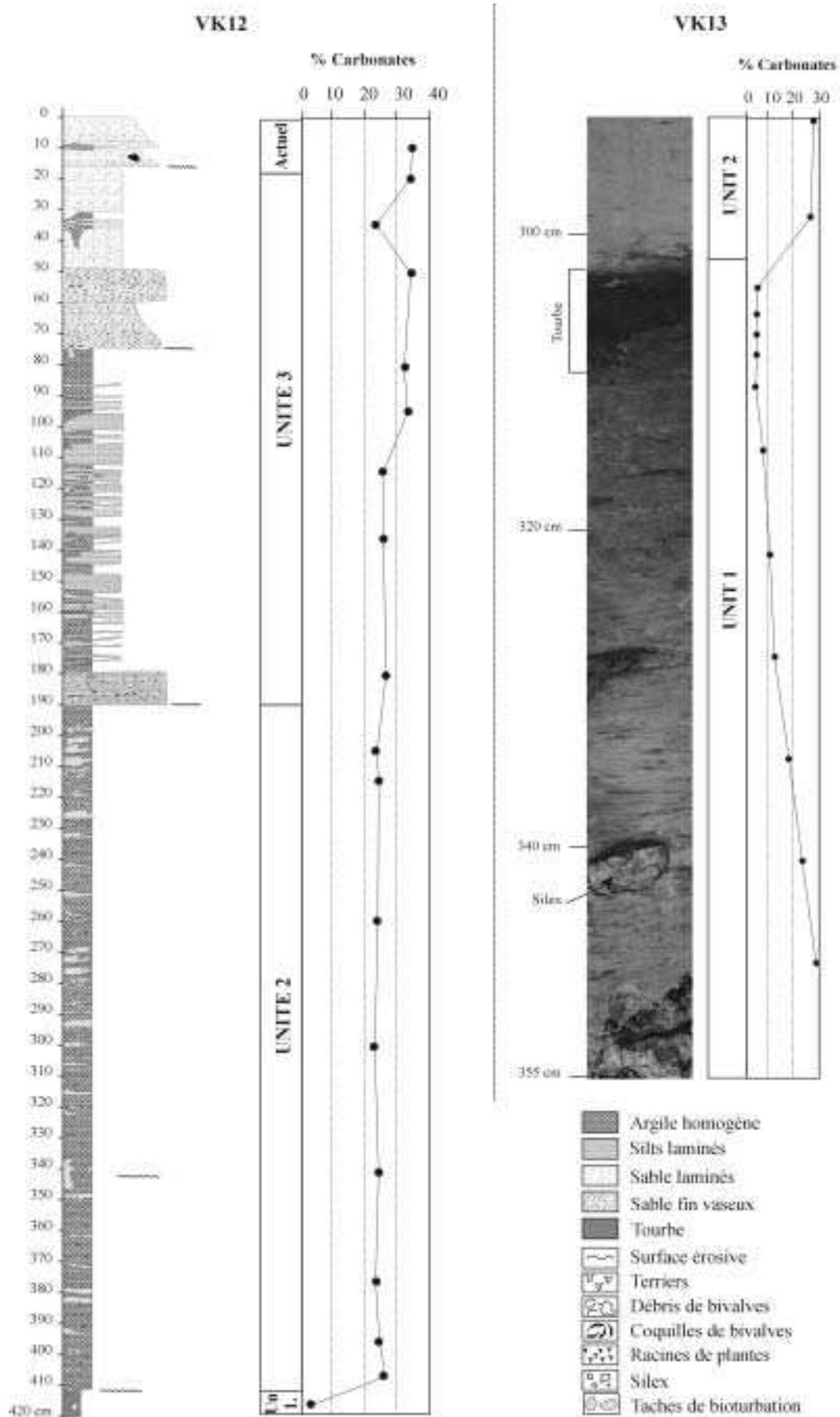
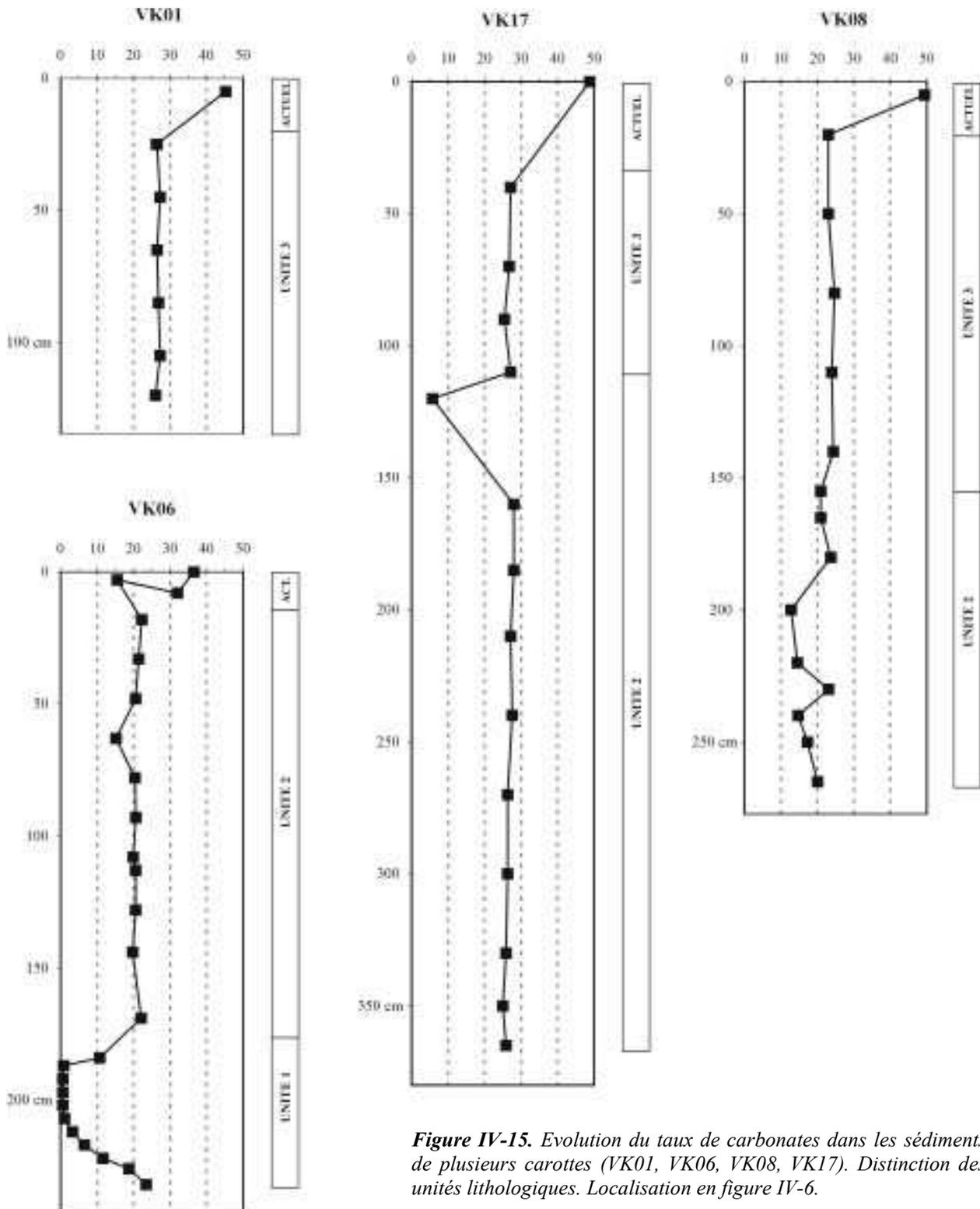


Figure IV-14. Evolution du taux de carbonates selon les unités traversées: carottes VK12 et partie de la VK 13 (mission VASTEDEBA III).



**Figure IV-15.** Evolution du taux de carbonates dans les sédiments de plusieurs carottes (VK01, VK06, VK08, VK17). Distinction des unités lithologiques. Localisation en figure IV-6.

L'abondance de matières organiques de certains niveaux, associée à la présence de débris végétaux ou de tourbe, est révélatrice d'une productivité planctonique élevée, d'une eutrophisation des fonds ou d'un enfouissement rapide ne permettant pas le développement des phénomènes d'oxydation.

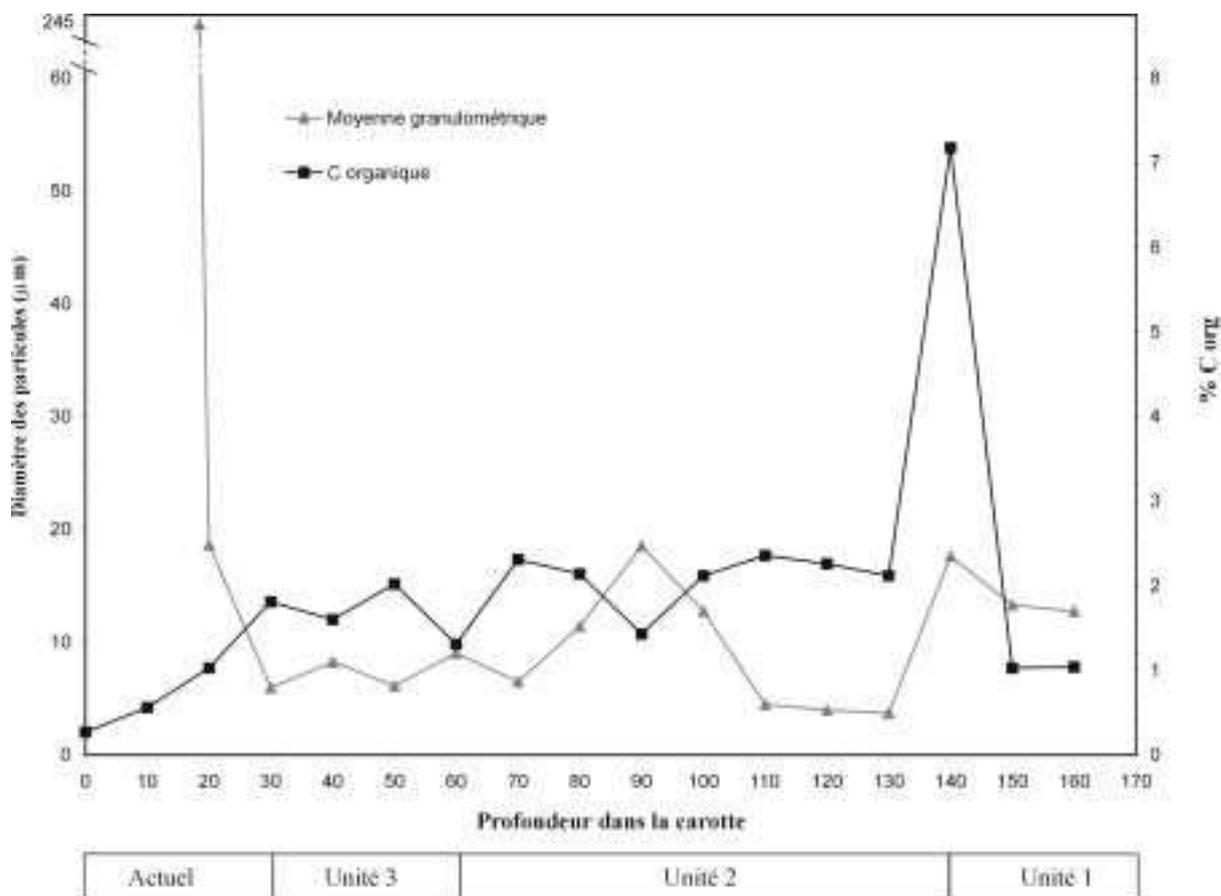


Figure IV-16. Evolution du taux de carbone organique et de la moyenne granulométrique dans la carotte 2678.

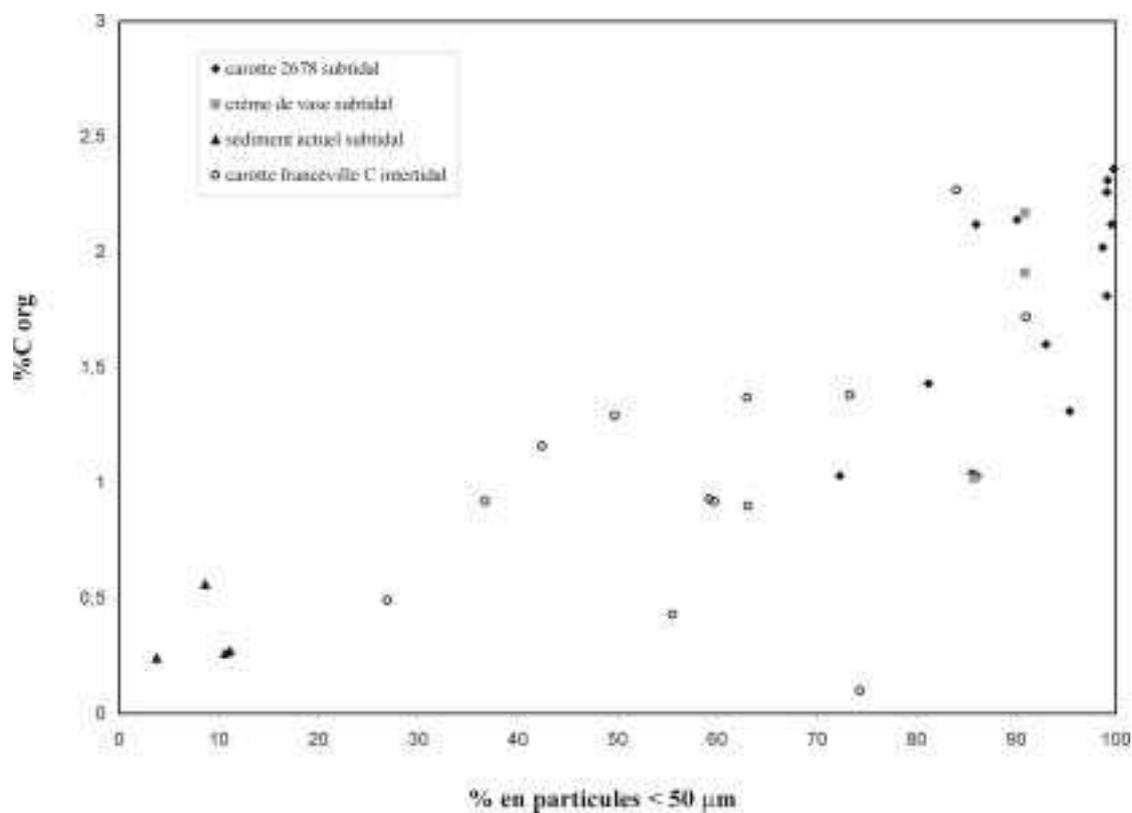


Figure IV-17. Relation entre le pourcentage de carbone organique et la fraction fine totale du sédiment dans les carottes de la Baie de Seine sud-orientale: argiles holocènes intertidales (Franceville) et subtidales (2678), sédiments actuels (crème de vase et sables envasés).

### 3.2.2.5 Caractéristiques physiques: teneurs en eau et cohésion

Pour les sédiments holocènes étudiés, l'état de consolidation des argiles est étroitement lié à la teneur en eau du sédiment. Ces teneurs en eau ont été mesurées<sup>3</sup> dès l'ouverture sur deux carottes représentatives (VK12 et VK17) dans les unités 2 et 3. Des mesures de cohésion non drainée ont également été effectuées à l'aide d'un scissomètre de laboratoire Wykeham Farrance (type WF-23500).

Dans l'**unité 2**, composée d'argile très compacte homogène, les teneurs en eau sont très faibles de l'ordre de 5%. Elles peuvent toutefois atteindre 15% au sein de l'**unité 3** du fait du drainage lié à la présence des sables. C'est l'unité 2 qui montre les plus fortes valeurs de résistance au cisaillement:  $5 \text{ KN.m}^{-2}$  en moyenne et des valeurs qui peuvent atteindre  $10 \text{ KN.m}^{-2}$ . Cependant, les intercalations sablo-silteuses observées dans l'unité 2 réduisent la cohésion autour de  $2 \text{ à } 3 \text{ KN.m}^{-2}$ . On remarque également que la teneur en eau mesurée est en rapport inverse avec la cohésion non drainée. En comparaison, les sédiments actuels de l'estuaire de la Seine ont des cohésions<sup>4</sup> de l'ordre de  $0,3 \text{ KN.m}^{-2}$  dans l'embouchure (zones d'envasement temporaire) et pouvant atteindre  $4 \text{ à } 5 \text{ KN.m}^{-2}$  dans les secteurs à envasement persistant (chenal nord) (Lesourd, 2000). Les valeurs de cohésions obtenues sur les argiles holocènes sont très supérieures à celles mesurées dans l'embouchure de la Seine, du fait de leur âge.

### 3.2.2.6 Minéralogie des argiles

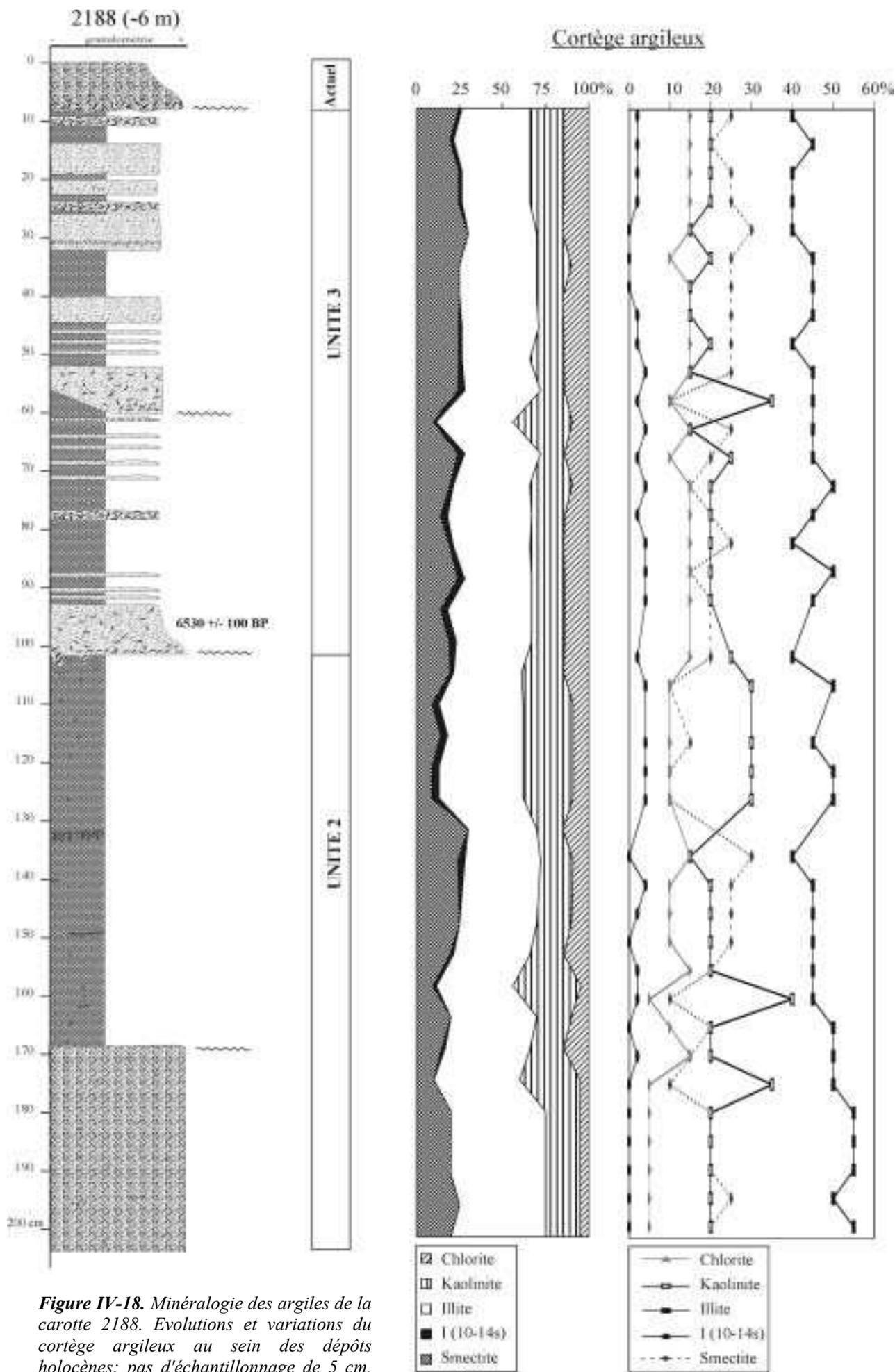
L'étude des minéraux argileux des sédiments holocènes a été réalisée par diffractométrie aux rayons X (diffractomètre Philips X'Pert, anticathode au cobalt) de la fraction granulométrique décarbonatée inférieure à  $2 \mu\text{m}$  selon le protocole utilisé au Centre M2C (Caen). Ces sédiments reliques avaient fait l'objet d'une étude minéralogique préalable sur deux carottes Küllenberg, 1122 et 1118 (Lesourd, 2000), avec pour cortège argileux représentatif 40% d'illite, 20% de chlorite, 10% de kaolinite et 10 à 20 % de smectite. Des chlorites gonflantes et des interstratifiés (10-14s) avaient également été mises en évidence dans quelques niveaux.

Pour notre détermination des cortèges argileux, la carotte 2188, montrant des variations de faciès intéressantes et ayant fait l'objet d'une étude palynologique, a été sélectionnée. Un pas d'échantillonnage de 5 cm a été choisi sur toute sa longueur (205 cm). Les valeurs obtenues sur 37 niveaux de cette carotte varient entre: 40-55% d'illite, 15-30% de kaolinite, 10-30% de smectite et 5-15% de chlorite (*fig. IV-18*).

---

<sup>3</sup> Par simple rapport de la masse de l'eau sur la masse du sédiment sec.

<sup>4</sup> Les vases dont la rigidité initiale est inférieure à  $0,5 \text{ KN.m}^{-2}$  se comportent comme un fluide visqueux (Larsonneur *et al.*, 1968). Migniot (1968) définit la transition entre vase fluide et vase plastique à une valeur de rigidité initiale comprise entre 1 et  $3 \text{ KN.m}^{-2}$ . Les vases compactes ont une cohésion supérieure à  $5 \text{ KN.m}^{-2}$ .



**Figure IV-18.** Minéralogie des argiles de la carotte 2188. Evolutions et variations du cortège argileux au sein des dépôts holocènes; pas d'échantillonnage de 5 cm. Légende du log lithologique, cf. fig. V-13, p. 236.

Ces valeurs sont en accord avec ceux obtenus par Lesourd (2000) avec cependant des pourcentages en kaolinite plus faibles et des taux de chlorite supérieurs. Cette différence peut être due au fait que les moyennes calculées par Lesourd portent sur un plus petit nombre d'analyses (12) et à une différence d'interprétation des diffractogrammes. Le cortège argileux dans cette carotte est relativement constant, bien que le pourcentage d'illite diminue régulièrement depuis la base (55%) de la carotte et jusqu'à 140 cm (40%) (fig. IV-18). La chlorite est le seul minéral argileux dont le pourcentage varie au passage entre les **unités 2 et 3**, vers 1 m de profondeur: 10 et 5% dans l'unité 2 puis environ 15% pour l'unité 3. Aucune chlorite gonflante n'a été retrouvée dans ces lames d'argiles orientées contrairement à l'étude précédente (Lesourd, 2000). Par contre, ces nouvelles analyses montrent des proportions non négligeables d'argiles interstratifiées irréguliers de type (10-14s) qui se retrouvent à tous les niveaux de la carotte (fig. IV-18).

### 3.2.2.7 Analyse palynologique

Les analyses palynologiques ont été réalisées par M. Clet au sein de notre laboratoire M2C. L'étude a porté sur 2 carottes ayant fait l'objet de datations  $^{14}\text{C}$  (carottes 2188 et VK12, tabl IV-2, fig. IV-6). Les taxons marquant les principales subdivisions de l'Holocène ont été étudiés: le noisetier (*Corylus*), le pin (*Pinus*), le chêne (*Quercus*), le noyer (*Juglans*), l'aulne (*Alnus*), et le tilleul (*Tilia*), ainsi que les pollens de céréales, de graminées ou d'herbacées correspondant à un milieu halophile (*Chenopodiaceae*).

Les variations des assemblages palynologiques de la carotte 2188 permettent de distinguer trois des unités lithostratigraphiques de la séquence holocène décrite précédemment (fig. IV-19, p. 246). La carotte VK12, peu concentrée en pollens (i.e. < 5 000 grains/g de sédiments), montre peu de variations dans les assemblages polliniques. Ce déficit en pollen est révélateur d'un remaniement des sédiments, comme nous l'avons déjà noté, en particulier dans l'unité 2 (fig. IV-11, p. 232, V12  $\ominus$  niv. 200-237 cm).

L'assemblage pollinique contenu dans l'**unité 1** a été déterminé à la base de la carotte VK12 puisque cette unité n'est pas atteinte dans la carotte 2188 (figs. V-13 et V-20, p. 247). Les taxons d'arbres présents dans cette unité sont le pin (10%), le chêne (15-20%), le noisetier (30%) auxquels s'ajoutent des tubuliflores (typiques des landes et dunes, 15%).

Les espèces d'arbres présentes dans l'**unité 2** (VK12 et 2188, figs. V-19 et V-20) sont le pin (15-20%), le chêne (15-25%) et le noisetier (15-20%). Cette végétation correspond au début de la période Atlantique (8 000 ans BP). La base de la carotte 2188 est caractérisée par une végétation halophile de schorre dont les pourcentages dépassent 50% (fig. IV-19). La concentration supérieure à 10 000 grains par gramme de sédiment dans cette carotte ainsi que la diversité taxonomique des herbacées, supérieure à la moyenne du diagramme, sont des

arguments pour affirmer que les sédiments sont en place et que la ligne de rivage était proche. Cette analyse palynologique permet d'individualiser 4 sous-zones à l'intérieur de l'unité 2 de la carotte 2188 (*fig. IV-19*):

- 1) à la base: les pourcentages élevés de pollens de chénopodiacées indiquent le développement d'un schorre important, avec des chênes et des pins dans l'arrière pays,
- 2) 153-138 cm: les pourcentages de chénopodiacées diminuent et les pollens d'arbres augmentent: les noisetiers sont plus nombreux dans le paysage et une végétation de dune se met en place,
- 3) 138-113 cm: le diagramme montre des oscillations dans le développement du schorre et la présence de marécages d'eau douce en arrière du paysage. Les pourcentages d'arbres diminuent: le chêne est moins représenté (baisse de 5 à 15%) et parfois dominé par le pin,
- 4) au sommet de l'unité (113-103 cm): le schorre redevient prépondérant et les pourcentages de pollens de pins diminuent.

Le maximum de pollens de chénopodiacées correspond à une période d'extension du schorre. Il peut être interprété comme représentatif d'une période régressive ou de stabilisation du niveau marin lors de la transgression, mais peut aussi avoir une cause locale, comme le développement d'une barrière protectrice. Les augmentations très significatives de l'étendue du schorre notés à 165 et 110 cm de la carotte 2188 (*fig. IV-19*), ainsi que celle plus subtile à 130 cm peuvent avoir ces causes. Toutefois, les travaux sur la transgression flandrienne ont montré qu'elle s'est déroulée avec une série d'oscillations négatives et positives (Larsonneur, 1971; Ters *et al.*, 1971; Huault *et al.*, 1974; Lefebvre *et al.*, 1974; Clet-Pellerin *et al.*, 1976; Larsonneur, 1977; Morzadec-Kerfourn, 1995). En Baie et estuaire de Seine, deux épisodes régressifs ont ainsi été mis en évidence: l'un avant 8 000 ans BP et l'autre vers 7 200 ans BP (Lefebvre *et al.*, 1974). La date de 6530 ans BP ( $^{14}\text{C}$ ) obtenue à 95-100 cm incite à penser que les deux indices d'extension du schorre notés dans la carotte 2188 (165 et 110 cm) pourraient correspondre à ces deux épisodes.

L'**unité 3** se distingue très nettement de l'unité sous-jacente par le pourcentage des arbres élevés avec une prépondérance du chêne (30 à 35%) et du noisetier dans la carotte 2188 (*fig. IV-19*). Les pourcentages de pollens de tilleul et d'aulne permettent, malgré la bioturbation importante de la carotte VK12, de bien distinguer le passage entre les unités 2 et 3 (*fig. IV-20*). Ce passage apparaît également au sein des assemblages de diatomées présentes dans cette carotte d'après étude préliminaire réalisée par Guillaume Hermier et Marie-Françoise Huault et (laboratoire M2C, Rouen): à 1,9 m dans la carotte VK12, les espèces tychoplanctoniques (*Cymatosira belgica*, *Delphineis minutissima*, *Delphineis surirella*, *Raphoneis amphiceros*) prolifèrent aux dépens des espèces planctoniques; au-dessus de 1,2 m, c'est le phénomène inverse qui se produit probablement lié à une plus forte agitation du milieu. L'interprétation de ces résultats est rendue difficile compte tenu de l'abondance des formes planctoniques et de la bioturbation qui affecte plus de la moitié de la carotte VK12. Le travail initié sur cette carotte

devrait se poursuivre sur d'autres carottes prélevées lors des missions VASTEDEBA. Dans l'unité 3, les proportions de chénopodiacées sont faibles et au sommet, le pourcentage de pollens d'arbres augmente, plus particulièrement le noisetier et l'aulne (carottes 2188 et VK12, *figs. V-19 et V-20*). La base de l'unité 3 peut être associée à la fin de la période Atlantique. On ne peut déceler dans cette unité d'indice de variation du niveau marin dans les carottes étudiées.

Le sommet de l'**unité 3** montre des proportions de chêne et de noisetier qui diminuent alors que les graminées et les cypéracées reprennent de l'importance (carottes 2188 et VK12, *figs. V-19 et V-20*). Les pollens de noyer (*Juglans*), faiblement représentés (< 5%), n'apparaissent que dans l'unité sommitale des carottes 2188 et VK12, associés à des plantes cultivées de type "céréale" (*fig. IV-20*, VK12 niv. 0-75 cm). Leurs présences à ce niveau de la carotte sont des indices d'activités humaines, extension de l'agriculture et de la déforestation, qui se sont développées après la colonisation romaine, il y a 2 000 ans BP. Ces résultats sont cohérents avec la datation  $^{14}\text{C}$  de  $1\,210 \pm 60$  ans BP obtenue sur la carotte VK12 entre 40-65 cm de profondeur.

En résumé, l'analyse palynologique est complémentaire des datations  $^{14}\text{C}$  et permet de retrouver les principales limites lithologiques. Elle donne des informations sur le milieu de dépôt et suggère l'enregistrement de 2 épisodes régressifs qui pourraient correspondre à ceux datés à proximité de 8 200-8 000 ans BP et 7 200 ans BP.

---

La description, l'analyse et l'interprétation des carottes recueillies au cours des récentes missions en mer ont abouti à une première synthèse chronostratigraphique du remplissage holocène des fonds marins de l'actuelle Baie de Seine sud-orientale. Cette étude s'appuie sur les résultats obtenus sur un nombre encore "limité" de carottes dont l'étude se poursuivra ultérieurement.

---

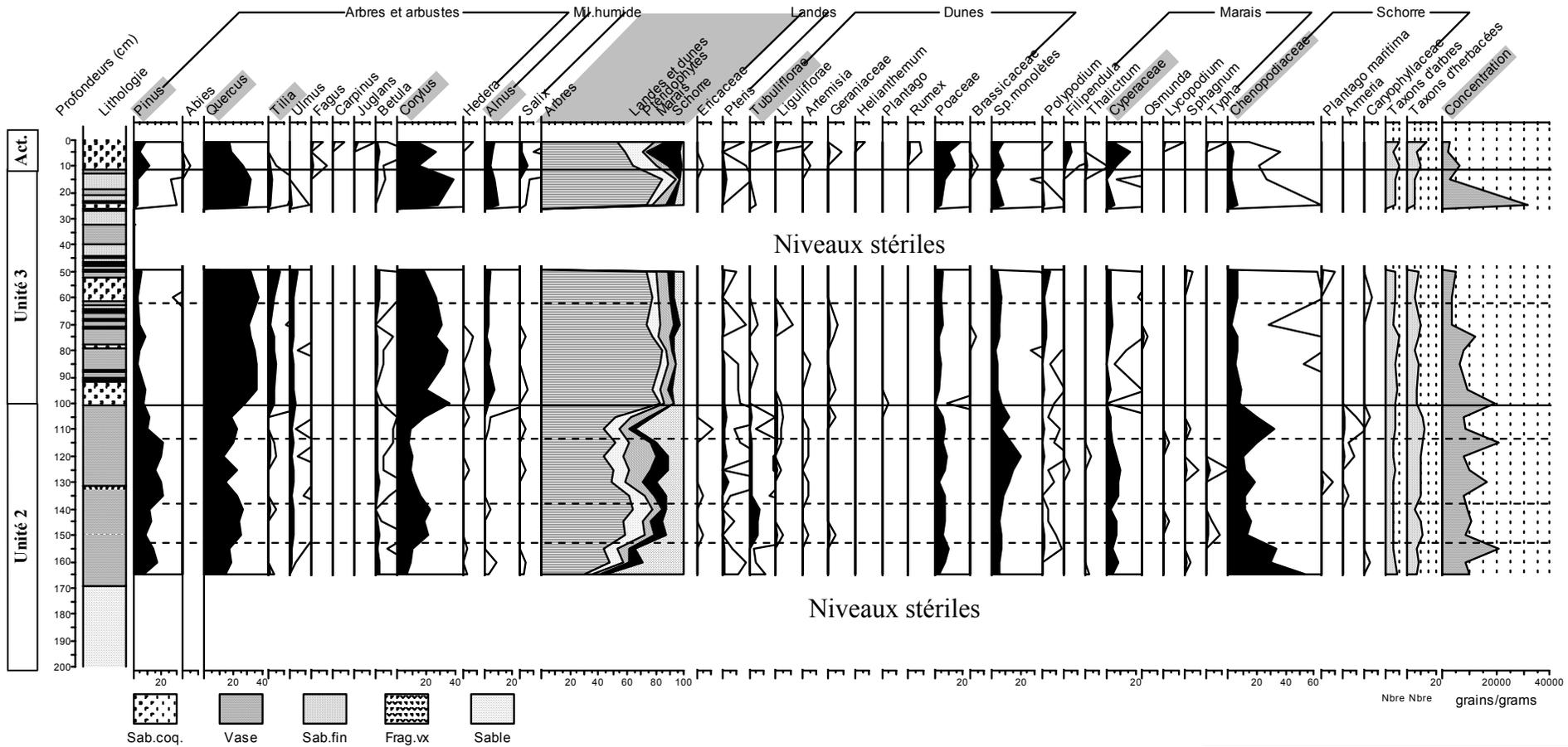
*Figure IV-19. Données palynologiques obtenues sur la carotte 2188 en page 246.*

*Figure IV-20. Données palynologiques obtenues sur la carotte VK12 en page 247.*

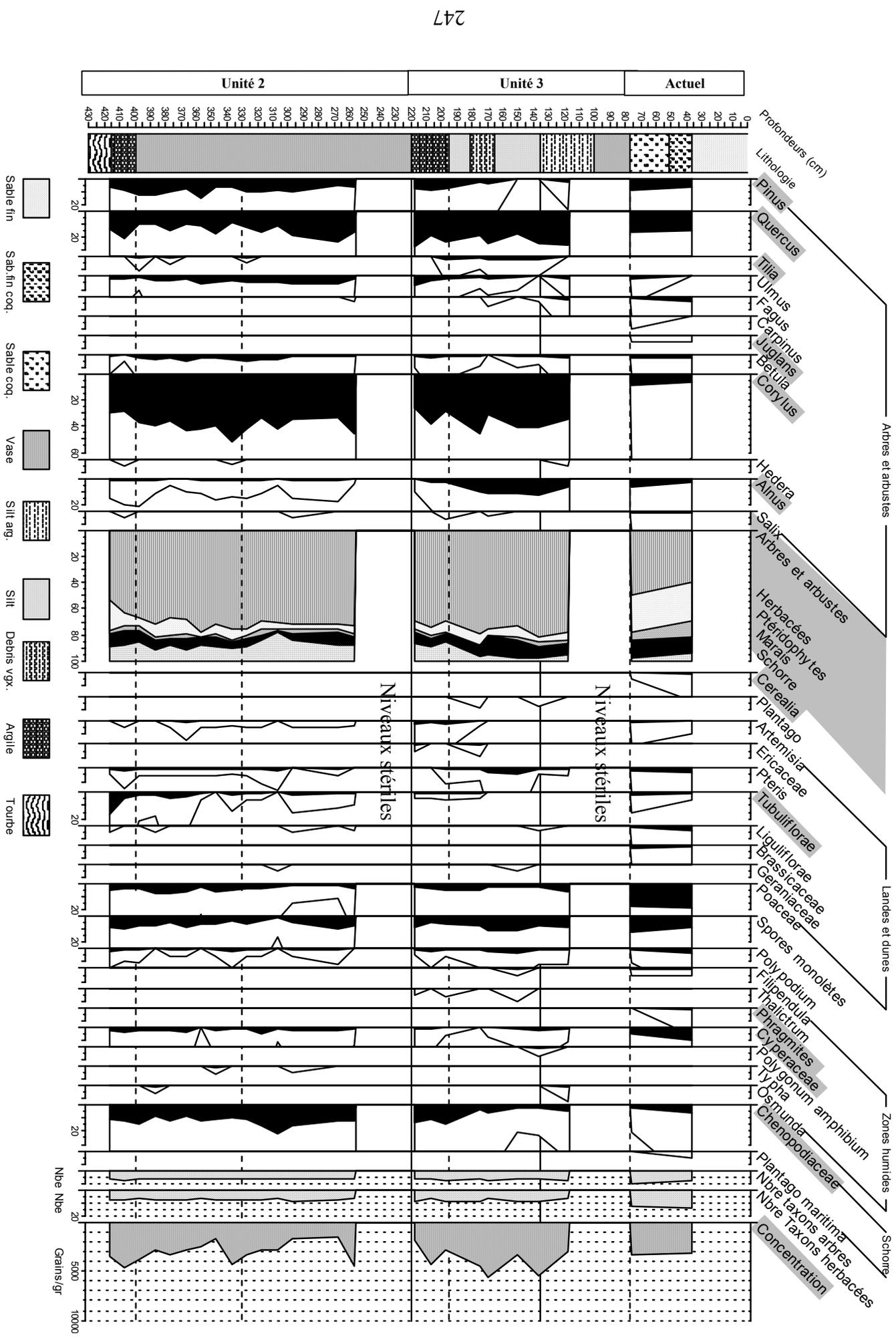
*Dans les deux figures, les zones grisées soulignent les données (pollens, assemblages, concentrations) commentées dans le texte. Le tableau de correspondance entre les noms latins et communs s'applique aux deux figures.*

CAROTTE S.2188

Analyse : M.Clet, 2001



<i>Pinus</i>	Pin
<i>Quercus</i>	Chêne
<i>Tilia</i>	Tilleul
<i>Juglans</i>	Noyer
<i>Corylus</i>	Noisetier
<i>Alnus</i>	Aulne
<i>Phramites</i>	Graminés
<i>Cyperaceae</i>	Cyprécés
<i>Cerealía</i>	Céréale
<i>Chenopodiaceae</i>	Chénopodiacée



### 3.3 Etude de dépôts reliques intertidaux de la plage de Franceville-Merville

L'étude des dépôts holocènes submergés m'a conduit à rechercher sur le littoral entre Ouistreham et Villers-sur-Mer des informations permettant de compléter l'analyse stratigraphique de la série holocène de ce secteur géographique.

#### 3.3.1 Résultats

Les observations menées en 1944 par Bassompierre sur le littoral entre Villers-sur-Mer et l'embouchure de l'Orne n'avaient pas signalé de dépôts fossiles sur cette portion de côte (Bassompierre, 1944). Pourtant, sur la plage de Franceville-Merville, à l'ouest de Cabourg, j'ai observé des affleurements d'argiles compactes, à passées tourbeuses, sous forme de placages discontinus en bas de plage (à proximité du zéro CM) ou plus proche du littoral à l'arrière des grandes barres sableuses qui modèlent cette partie du littoral (*fig. IV-21*). Ces affleurements sont surtout visibles en période hivernale ou après les tempêtes car ils sont saisonnièrement recouverts de sables. Certains affleurements présentent un relief non négligeable, de l'ordre de 30 cm au niveau des barres sableuses (*fig. IV-22*). Les surfaces d'affleurement les plus importantes sont situées à plus de 900 m du littoral et forment des lentilles (maximum 75 x 50 m) de vase grise compacte ponctuées de nombreux interlits de débris végétaux. L'hypothèse d'une mise en place actuelle de ces dépôts a été rapidement écartée, les mesures de radionucléides artificiels effectuées sur ces sédiments (D. Boust, IRSN, Octeville) confirmant l'âge "ancien" de ces dépôts: l'absence d'activité en  $Cs^{137}$ ,  $Co^{60}$  et  $Rh^{106}$  des argiles démontre une mise en place antérieure aux années 1950.

Quelques carottes ont été prélevées à la main entre mars et octobre 2001 sur les trois affleurements reconnus sur la plage (*fig. IV-21*) pour connaître les caractéristiques granulométriques et l'âge des dépôts. Ces carottages nous ont montré que ces argiles n'étaient pas très épaisses, au maximum 30 à 40 cm. Des niveaux de sable fins à moyens, coquilliers, des galets mous de vase et des passées tourbeuses sont interlités dans les argiles (*fig. IV-23*). Les radiographies réalisées sur ces carottes montrent des faciès vaseux très homogènes vers la base des dépôts et au contraire lités et beaucoup plus bioturbés au sommet (*fig. IV-24*).





**Figure IV-21.** Photos aériennes de la plage de Franceville-Merville et localisation des affleurements de sédiments reliques rencontrés sur la plage. Le site le plus au Nord se trouve à proximité du 0 CM et les 2 autres au sud-est sont en arrière d'une grande barre sableuse (photos IGN 1982 pour le compte du SHOM).

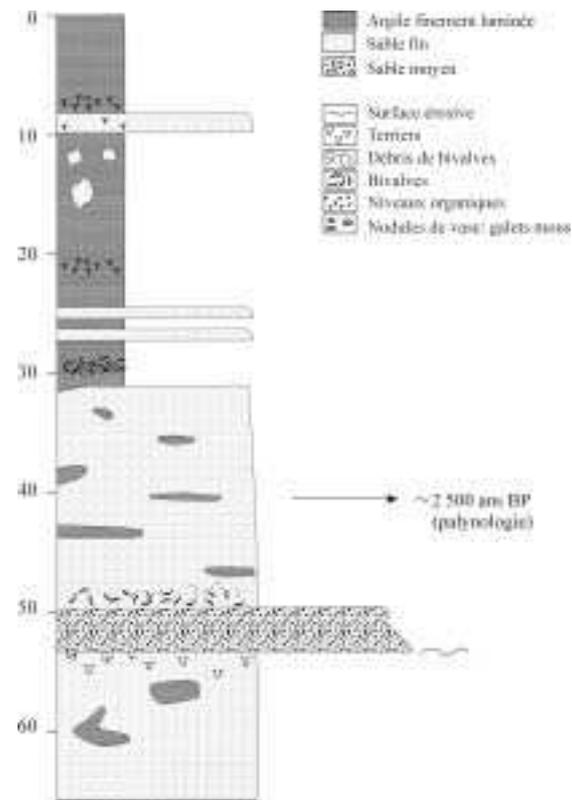


Figure IV-23. Log lithostratigraphique de synthèse des dépôts reliques décrits sur la plage de Franceville-Merville.

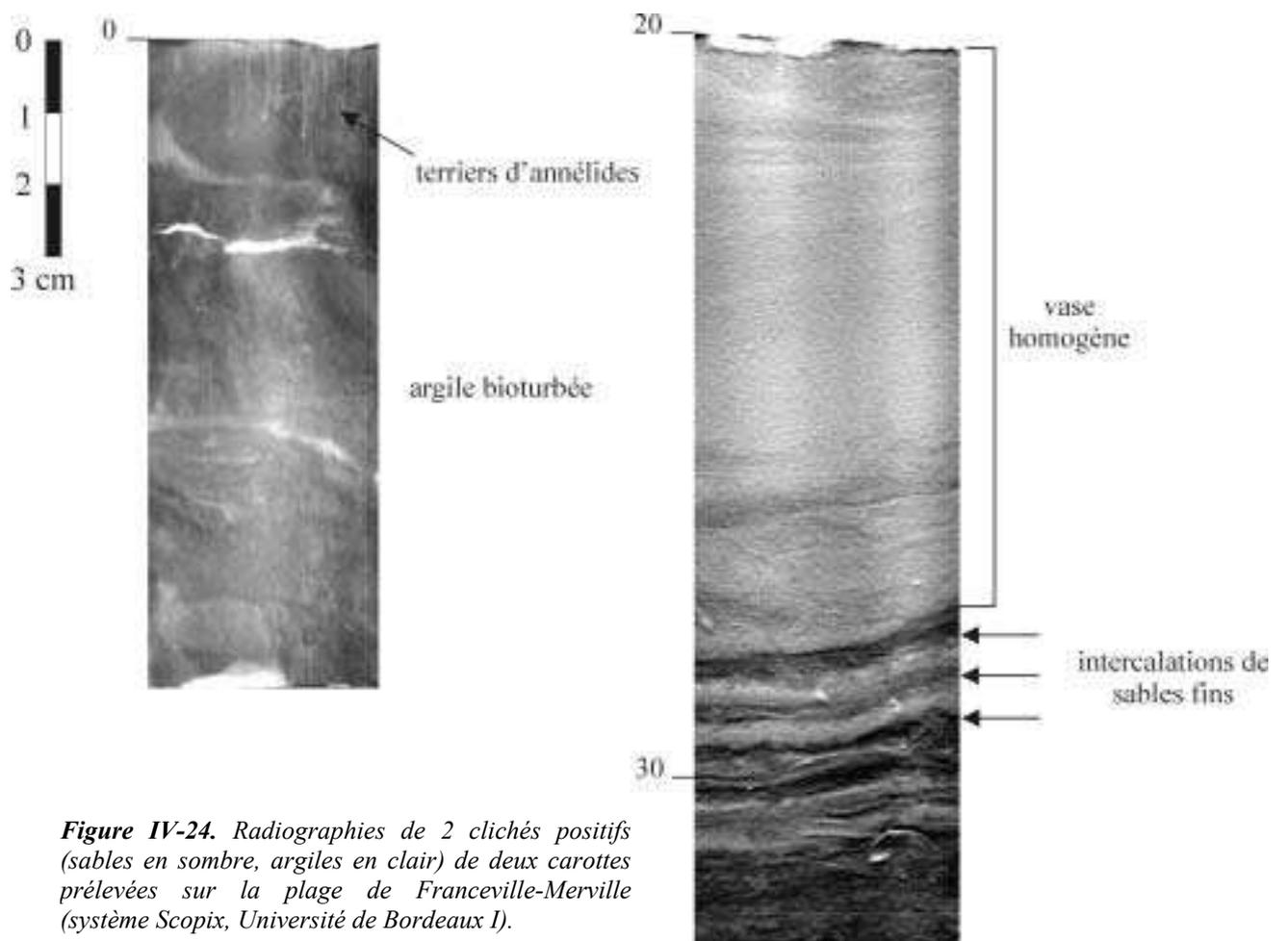


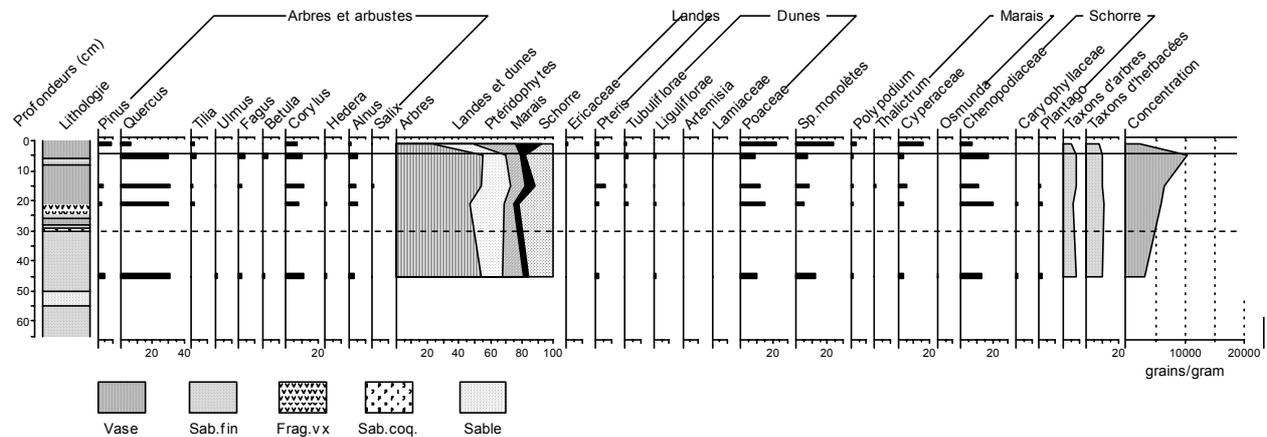
Figure IV-24. Radiographies de 2 clichés positifs (sables en sombre, argiles en clair) de deux carottes prélevées sur la plage de Franceville-Merville (système Scopix, Université de Bordeaux I).

Les teneurs en carbonates mesurés dans ces dépôts sont de 30-35 %, à l'exception des niveaux coquilliers (30 cm sur la *fig. IV-23*) où les valeurs atteignent 43%. Le cortège argileux de ces vases compactes est constant: illite (40%), smectite (25%), kaolinite (20%) et chlorite (15%). Ces valeurs se rapprochent de celles déterminées sur les argiles holocènes subtidales. Les interstratifiés sont aussi présents, jusqu'à 5%.

Une étude palynologique a été réalisée sur la carotte prélevée dans l'affleurement le plus au Nord, à proximité de la limite intertidale inférieure. L'analyse pollinique réalisée par M. Clet (UMR M2C, Caen) (*fig. IV-25*) indique une mise en place en contexte intertidal, comme le montrent les pourcentages élevés de pollens d'espèces halophytes de type chénopodiacée (ex.: obione, salicorne). Dans le paysage en arrière de cet ancien schorre, la végétation était composée de fougères et le chêne était l'arbre dominant (*fig. IV-25*). Le noisetier était également bien représenté. La distribution des assemblages polliniques à la base de la carotte suggère une formation de ces dépôts contemporaine du début de la période du Subatlantique, soit environ 2 500 ans BP en Normandie. Deux essais de datation  $^{14}\text{C}$  sur des niveaux organiques ont également été réalisés, mais sans résultat du fait d'une dégradation trop importante de la matière organique.

## FRANCEVILLE

Analyse : M.Clet, 2001



**Figure IV-25.** Données palynologiques obtenues dans une carotte prélevée sur la plage de Franceville-Merville.

### 3.3.2 Conclusion

Des dépôts intertidaux reliques, découverts à la limite du 0 marin CM de la plage de Franceville-Merville, forment des grandes lentilles d'argile compacte à passées tourbeuses, parfois en surélévation par rapport au niveau de la plage. L'âge de ces dépôts est estimé par

l'étude palynologique à 2 500 ans BP, début du Subatlantique, et correspond comme des dépôts analogues à Luc-sur-Mer (*cf. annexe 4*) et Omaha Beach, aux derniers stades de tourbification avant l'invasion marine du domaine littoral datée aux alentours de 2 000 ans BP. Ces argiles reliques en domaine littoral se sont mises en place en contexte de marais maritime et sont contemporaines de l'unité sommitale 3 rencontrée dans les fonds marins peu profonds entre Cabourg et Villers-sur-mer.

#### 4. Synthèse: séquence type du comblement holocène de la Baie de Seine sud-orientale

La synthèse des différentes carottes prélevées depuis 1999 sur notre site d'étude de la Baie de Seine sud-orientale permet de proposer l'histoire du comblement de cette partie de la baie au cours de la transgression flandrienne.

L'**unité 1**, la plus ancienne dans l'Holocène, semble reposer sur le toit du substratum mésozoïque dont la géométrie du toit a été décrite par sismique réflexion (Auffret & d'Ozouville, 1986). Même si ce substratum n'a pas été atteint par les carottages, des indices de sa proximité existent avec la présence de nodules de calcrète et des fragments de silex. Cette unité, composée d'argiles très compactes, est très riche en niveaux organiques, tourbes et morceaux de bois décomposés, qui ont été datés à plus de 8 000 ans BP sur 4 carottes différentes (*tabl. IV-2*). Cette unité est caractéristique de l'environnement d'une plaine d'inondation évoluant vers un environnement marécageux en condition anaérobie.

L'**unité 2** tend vers un environnement de type marais maritime. C'est une argile gris bleuté homogène contenant de nombreuses radicelles de roseaux. L'étude palynologique a permis de distinguer 2 épisodes régressifs au sein de cette unité; ces épisodes peuvent être rapprochés de ceux enregistrés dans l'estuaire de la Seine et datés de 8 000 et 7 200 ans BP (Lefebvre *et al.*, 1974; Lefebvre, 1977a). Au sommet de cette unité, des sables moyens coquilliers transgressent ce milieu calme de décantation. Le recouvrement brusque par les sables est d'abord interprété comme le résultat d'évènements d'overwash, prémices des premiers épisodes d'invasion marine lors de la transgression flandrienne<sup>5</sup>. L'un de ces niveaux est daté de 6 820 ans BP (*tabl. IV-2*, VK16, niv. à 145-150, -9 m CM), résultat en accord avec la courbe de remontée du niveau marin établie par Larsonneur (1971) pour la Normandie et situant le niveau marin à -10 m CM au-dessous du niveau actuel il y a 7 000 ans BP. La limite entre l'unité 2 et l'unité 3 correspond à une surface d'érosion majeure. Les dépôts mis en place sur cette surface sont généralement des sables très coquilliers avec des âges entre 6 200 et 6 600 ans BP (*tabl. IV-2*).

---

<sup>5</sup> D'autres indices de cette "crise" transgressive existent également ailleurs sur le littoral du Calvados comme à Saint-Côme de Fresné (Lautridou *et al.*, 1987) (*Cf. complément d'information en annexe 3*).

A partir de cette période, une sédimentation littorale en environnement estuarien ouvert est enregistrée (**unité 3**), principalement constituée de lamines d'argile interlitées avec des silts et des sables fins (tidalites). Quelques rares passées sableuses très coquillières ont été datées de 4 010 et 1 260 ans BP. La datation la plus récente de 1 260 ans BP obtenue sur des coquilles de donaces en position de vie à seulement 40 cm du sommet de la carotte suggère une limite intertidale située autour de -2 à -3 m CM à 1 200-1 300 ans BP. La préservation de cette unité est incomplète: d'abord les cycles tidaux enregistrés sont toujours tronqués et ensuite son épaisseur totale, souvent inférieure à 2 m, correspond à plus de 5 000 ans de sédimentation. Au sommet de cette unité, l'étude palynologique témoigne de l'apparition de quantités significatives de plantes cultivées et du noyer; ils indiquent une activité humaine importante apparue après la colonisation romaine, il y a 2 000 ans.

La séquence holocène, d'épaisseur variable, est tronquée par une surface de ravinement par les vagues. Au-dessus, selon l'endroit, la couverture sédimentaire actuelle de sables fins à moyens, quand elle est présente, repose sur l'unité 3. Toutefois, en certains sites, l'unité 3 est absente et les sables couvrent directement l'unité 2.

---

**Bibliographie du chapitre IV**

---

- Auffret, J.-P. & Larssonneur, C.** (1977). Paléovallées et bancs sableux entre l'estuaire de la Seine et le Nord-Cotentin. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 21-33.
- Auffret, J.-P. & d'Ozouville, L.** (1986). Cartographie du prisme sédimentaire Holocène en Baie de Seine Orientale par sismique réflexion à haute résolution. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 109-116.
- Auzel, M. & Bourcart, J.** (1950). Sur l'érosion de la plage de Deauville pendant le printemps 1950. *Cahiers Océanographiques* II, 379-386.
- Avoine, J.** (1981). L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 236 p.
- Avoine, J.** (1994). Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. *Rapport d'étude, IFREMER - Port autonome du Havre*, Brest, 153 p.
- Bassompierre, P.** (1944). La tourbe dans le Calvados et principalement au nord de Caen. *Diplôme d'études supérieures de géologie, Caen*, 41 p.
- Clet-Pellerin, M., Dupeuble, P.-A., Helliun, M., Lefebvre, D., Pellerin, J., Brebion, P., Lauriat-Rage, A., Laudridou, J.-P. & Rioult, M.** (1987). Les formations marines et continentales du Pléistocène récent dans la région d'Asnelles-Saint-Côme-de-Fresné (Calvados). *Bulletin du Centre de Géomorphologie du CNRS* 32, 71-98.
- Clet-Pellerin, M., Huault, M.-F., Larssonneur, C. & Pellerin, J.** (1976). La basse vallée de l'Orne: le remblaiement périglaciaire et postglaciaire, l'évolution paléogéographique et l'histoire de la végétation. *Bulletin de la Société Limnéenne de Normandie* 105, 23-44.
- Elhai, H. & Larssonneur, C.** (1969). Dépôts tardiglaciaires et post glaciaires sur la côte du Calvados. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire* 2, 93-103.
- Guyader, J.** (1977). Le Quaternaire de la zone portuaire havraise. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 39-63.
- Huault, M.-F.** (1977). L'estuaire de la Seine au Quaternaire, chronologie absolue au radiocarbone. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 203.
- Huault, M.-F., Lefebvre, D., Hommeril, P., Guyader, J., Giresse, P. & Larssonneur, C.** (1974). L'évolution de la basse-vallée de la Seine depuis la dernière glaciation. *Mémoire de l'Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine (IGBA)* 7, 313-319.
- Larssonneur, C.** (1971). Manche centrale et Baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles, *Thèse d'Etat de l'Université de Caen*, 394 p.
- Larssonneur, C.** (1977). De la Baie de Seine à l'estuaire de la Seine, histoire du Quaternaire marin. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 9-19.
- Larssonneur, C., Migniot, C., Conard, M. & Dangeard, L.** (1968). Figures observées au cours d'expériences sur la remise en suspension des vases par les courants et sur l'action de matériaux en transit sur les fonds plus ou moins consolidés. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris* 266 (D), 758-760.
- Lautridou, J.-P., Pellerin, J. & Clet-Pellerin, M.** (1987). Les formations marines et continentales d'Asnelles-Saint-Côme-de-Fresné. *Association Française pour l'étude du Quaternaire, excursion du 28 au 31 mai 1987 "La normandie"*, 161-170.
- Lefebvre, D.** (1977a). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 67-72.
- Lefebvre, D.** (1977b). Les alluvions holocènes de basse-Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 73-74.
- Lefebvre, D., Huault, M.-F., Guyader, J., Giresse, P., Hommeril, P. & Larssonneur, C.** (1974). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine: synthèse sédimentologique, stratigraphique et paléogéographique. *Bulletin d'Information Géologique du Bassin de Paris* 39, 27-36.

- Lesourd, S.** (2000). Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal: zoom temporel du siècle à l'heure; application à l'estuaire de la Seine. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 280 p.
- Migniot, C.** (1968). Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. *La Houille Blanche* 7, 591-620.
- Morzadec-Kerfourn, M.T.** (1995). Coastal changes in the armorican massif (France) during the Holocene. *Journal of Coastal Research* 17, 197-203.
- Morzadec-Kerfourn, M.-T. & Delibrias, G.** (1972). Analyses polliniques et datations radiocarbone des sédiments quaternaires prélevés en Manche centrale et orientale. *Mémoire du BRGM* 79, 160-165.
- Pellerin, J.** (1977). Les nappes alluviales de l'Orne, leurs altérations et leurs relations avec les dépôts marins sur la côte du Calvados. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* XIV (4), 75-80.
- Porcher, M.** (1977). Lithostratigraphie des alluvions fluviales holocènes de la basse vallée de la Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 181-201.
- Taborin, J.** (1999). Différents type de tourbières. *Géochronique* 71, 8.
- Ters, M., Azema, C., Brebion, P., Churcher, C.S., Delibrias, G., Deneffe, M., Guyader, J., Lauriat-Rage, A., Mathieu, R., Michel, J.-P., Osborne, P.J., Rouvillois, A. & Shotton, F.W.** (1971). Sur le remblaiement holocène dans l'estuaire de la Seine au Havre (Seine Maritime), France. *Quaternaria* XIV, 151-174.
- Tessier, B.** (1992). Upper intertidal rhythmites in the Mont-Saint-Michel Bay (NW France): perspectives for paleoreconstruction. *Marine Geology* 110, 355-367.
- Volmat, M.** (1929). Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. *22<sup>ème</sup> cahier de la recherche hydrographique sur le régime des côtes*, 97-135.

# Chapitre V

---

## Synthèse et conclusions générales

<b>1. Histoire de la sédimentation fine depuis l'Holocène jusqu'aux épisodes événementiels actuels en Baie de Seine sud-orientale .....</b>	<b>259</b>
1.1 La sédimentation fine holocène (long terme, échelle de temps $10^4$ - $10^3$ ans) .....	259
1.2 La sédimentation fine depuis le XIX <sup>ème</sup> siècle (moyen terme, échelle de temps $10^2$ - $10^1$ ans) .....	263
1.2.1 Nature des fonds sédimentaires de la Baie de Seine orientale au cours du XIX <sup>ème</sup> siècle .....	263
1.2.2 Variations des fonds sédimentaires de la Baie de Seine orientale depuis 1913 .....	263
1.3 La sédimentation fine au cours des dernières années (court terme, échelle de temps $< 10^0$ ans) .....	265
1.3.1 Evolution pluri-annuelle (1995-2000) et inter-annuelle - saisonnière .....	265
1.3.2 "Crue estuarienne" .....	267
1.3.3 Evolution de la fraction fine en Baie de Seine orientale depuis 20 ans : envasement à moyen-terme des fonds subtidiaux ? .....	270
<b>2. Conclusions générales .....</b>	<b>271</b>
<b>3. Perspectives .....</b>	<b>274</b>

# Chapitre V

---

## Synthèse et Conclusions générales

### 1. Histoire de la sédimentation fine depuis l'Holocène jusqu'aux épisodes événementiels actuels en Baie de Seine sud-orientale

L'organisation des précédents chapitres de ce manuscrit correspond à la démarche originelle de ce travail de thèse qui a débuté par une analyse des documents d'archives disponibles au SHOM (chapitre II) comme préalable à l'étude des dépôts temporaires actuels de vase dans la Baie de Seine sud-orientale. Ainsi, les résultats de la reconnaissance de la sédimentation fine et des mécanismes associés sont présentés dans le chapitre III. La mise en évidence d'argiles holocènes à l'affleurement dans ces fonds a justifié leur étude permettant, d'accéder à l'étude la sédimentation fine préservée en ce secteur au cours de la période holocène (chapitre IV). La présente synthèse reprend nos résultats essentiels sur la nature et l'interprétation de la mise en place des sédiments fins dans la zone d'étude, en les restituant dans l'ordre chronologique, depuis des argiles continentales du début de l'Holocène jusqu'au système marin ouvert actuel avec ses dépôts temporaires attribués à des crues d'origine estuarienne.

L'enregistrement de la sédimentation fine à différentes échelles de temps est proposé ici: long terme ( $10^4$ - $10^3$  ans: Holocène), moyen terme ( $10^2$ - $10^1$  ans: séculaire à pluri-décennal) et court terme ( $< 10^0$  ans: inter-annuel ou saisonnier). Cette synthèse est basée sur un article récemment soumis à publication à la revue *Marine Geology*: "Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner shelf setting (Eastern Bay of the Seine, France)".

#### 1.1 La sédimentation fine holocène (long terme, échelle de temps $10^4$ - $10^3$ ans)

Cette partie de mon travail correspond à la première description litho-chronostratigraphique de la sédimentation holocène préservée en domaine subtidal ouvert en Normandie.

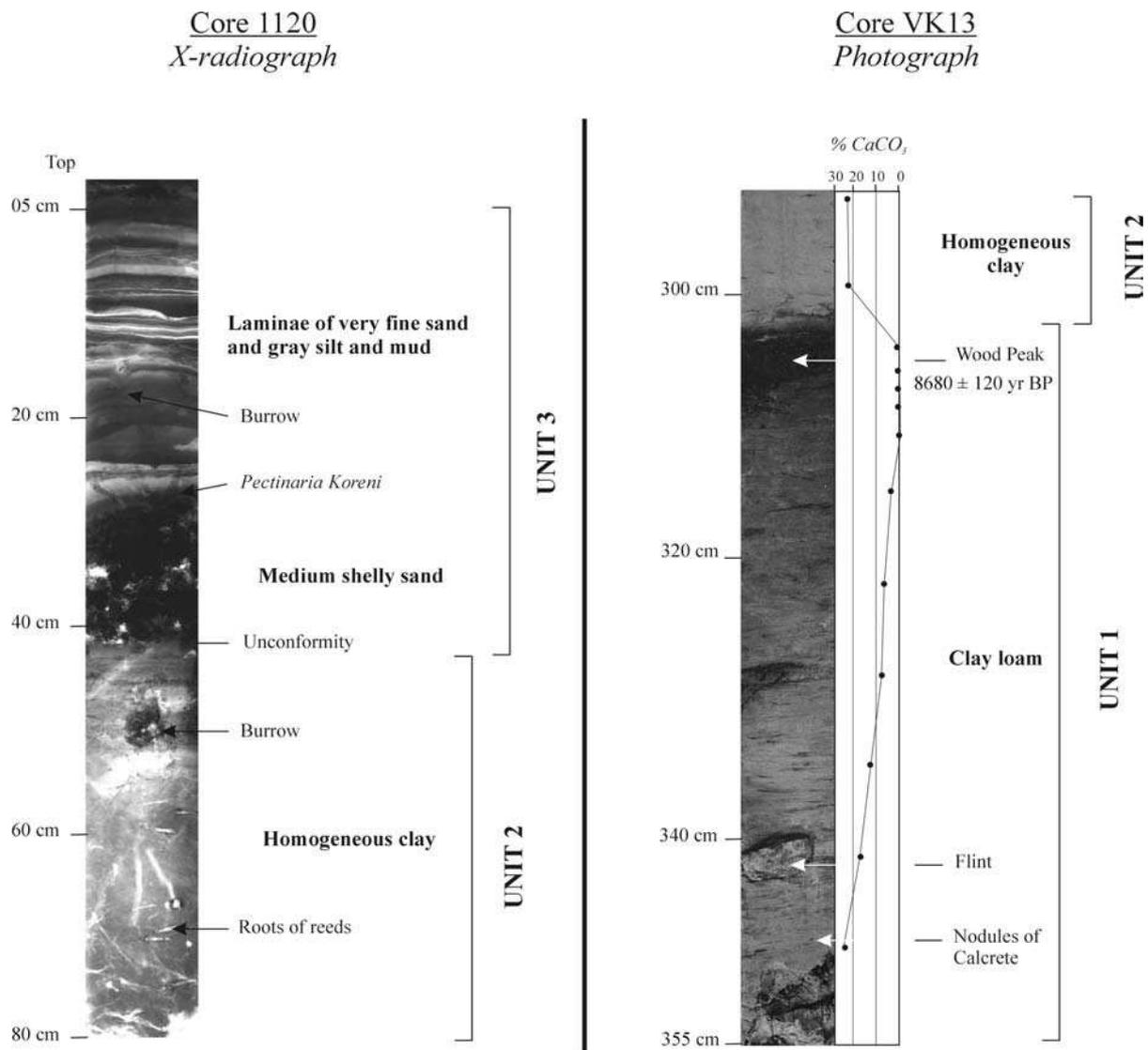
La reconstitution de la mise en place des dépôts holocènes de l'actuelle Baie de Seine sud-orientale aboutit à une séquence commencée en zone continentale abritée durant la dernière remontée du niveau marin. Malgré le fait que la paléo-géométrie anté-holocène du système ne soit pas précisément connue et que les carottes prélevées sont éloignées les unes

des autres d'une distance maximale de 10 km dans des fonds monotones, la comparaison des faciès a montré des corrélations qui ont conduit à différencier trois unités principales (*fig. V-1*). Leurs caractéristiques et leurs interprétations en terme de milieux sont résumées ci-après:

L'**unité 1** repose directement sur le substratum mésozoïque. Son épaisseur atteint au maximum 2,40 m sur les sédiments carottés. L'unité 1 est constituée d'argile à passées tourbeuses riche en débris de bois et montrant à la base des nodules carbonatés et des morceaux de silex (*fig. V-1*). Au sein de cette unité, les âges obtenus par datation  $^{14}\text{C}$  sont compris entre 9200 et 8000 ans BP (*fig. V-2*). Ces sédiments se sont mis en place au début de l'Holocène dans les zones latérales d'un ancien bassin fluvial (e.g. dans une plaine d'inondation).

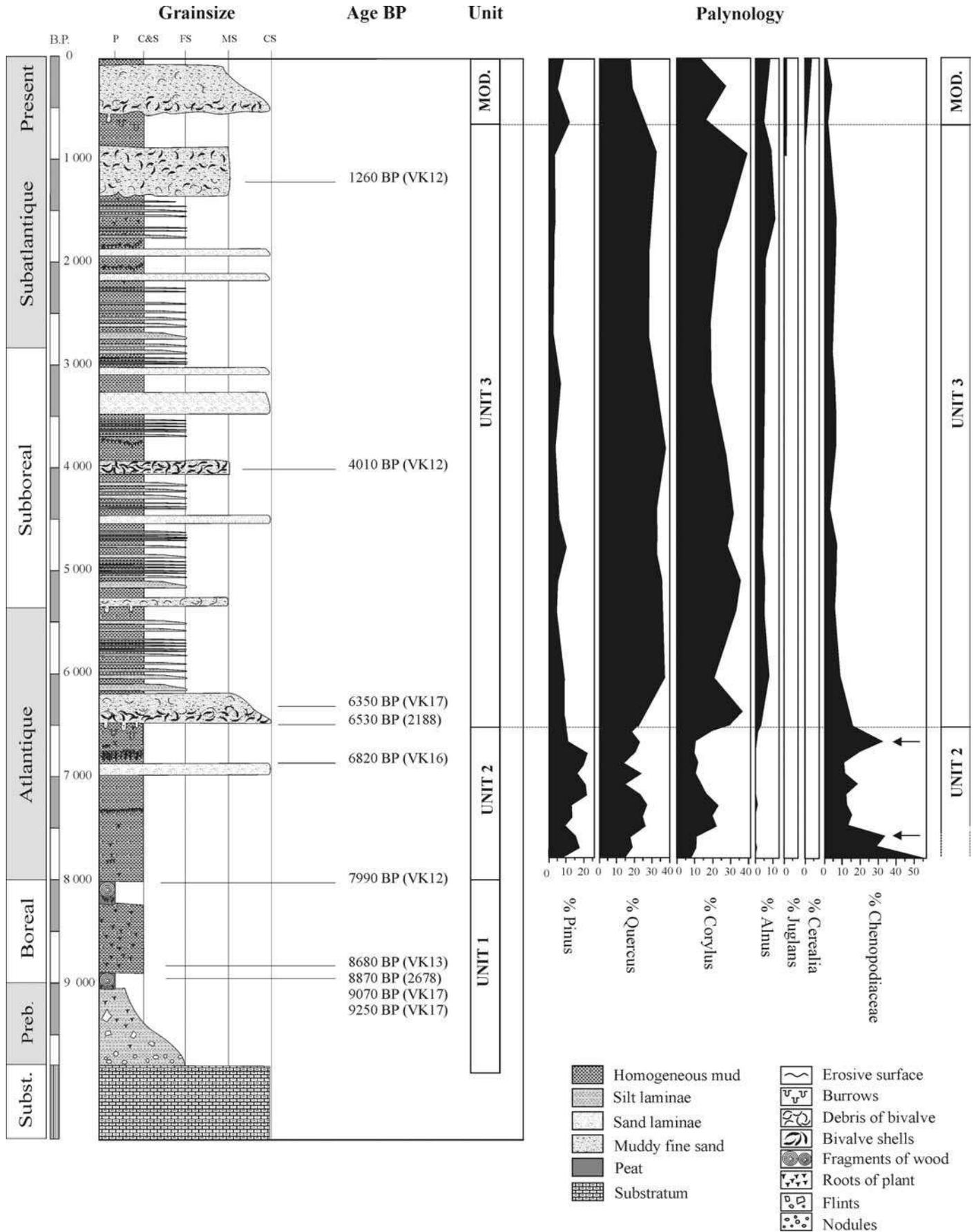
L'**unité 2**, d'une épaisseur de 1 à 2 m, est datée entre 8000 et 6500 ans BP. Elle correspond à un environnement protégé de marais maritime avec des argiles homogènes et riches en morceaux de bois et radicelles de roseaux (*fig. V-1*). La préservation de cette unité ne fut possible que dans des zones marginales du système en comblement, à l'image des enclaves reliques étudiées dans la Gironde (Pontee *et al.*, 1998). Les analyses palynologiques révèlent deux légers épisodes régressifs déterminés par le développement alternatif d'espèces halophytes et d'essences végétales caractéristiques d'un environnement de forêt (*fig. V-2*). A titre de comparaison, dans l'estuaire de la Seine et en Baie du Mont-Saint-Michel, ces épisodes ont été identifiés et datés de 8300-8000 ans BP et 7200-7050 ans BP (Lefebvre *et al.*, 1974; Morzadec-Kerfourn, 1995).

Le contact entre l'**unité 3** et l'unité 2 est marqué par une importante surface d'érosion associée à l'invasion marine au cours de la période Atlantique. Elle est datée de 6500 ans BP par des coquilles marines (*fig. V-2*). Néanmoins, dans la partie supérieure de l'unité 2, quelques lits de sables moyens coquilliers ont pu être datés et révèlent un début d'incursion marine vers 6800 ans BP, probablement liées à des épisodes de débordement de type "washover" qui ont recouvert subitement les dépôts saumâtres (*fig. V-2*). Ces âges sont en accord avec ceux proposés sur des sédiments normands à des profondeurs analogues (Larsonneur, 1977), le niveau marin étant estimé à -10 m en-dessous du niveau actuel vers 7000 ans BP (Morzadec-Kerfourn, 1995). L'**unité 3** correspond à un faciès interlité de sables fins et d'argiles (*fig. V-1*), mis en place pendant une longue période entre 6500 et 1260 ans BP dans un environnement tidal ouvert à l'agitation, comparable à ceux actuellement présents sur la vasière Nord de l'estuaire de la Seine (Lesourd, 2000). L'âge le plus récent, obtenu par datation  $^{14}\text{C}$ , est conforté par l'abondance de pollen de plantes cultivées (graminées et céréales) et par la présence significative de pollens de noyer (*Juglans*) apparus depuis l'occupation romaine, il y a 2000 ans BP (*fig. V-2*). Là où elle a été préservée, l'unité 3 n'a qu'une épaisseur faible (< 2 m), révélant à la fois un contexte peu favorable à la conservation des dépôts (taux de sédimentation résiduel faible), et surtout l'érosion ultérieure importante de ces sédiments à caractère tidal sous l'effet des vagues.



**Figure V-1.** Portions de 2 carottes (1120 et VK13) illustrant les faciès et les structures sédimentaires des trois unités lithostratigraphiques de la séquence de remplissage holocène de la Baie de Seine sud-orientale; localisation des carottes, figure V-6, p. 225 (Garnaud et al., soumis).

Il en résulte une surface d'érosion (surface de ravinement par les vagues) sur laquelle les sédiments sableux ou sablo-vaseux actuels viennent recouvrir les dépôts holocènes. Dans les petits fonds compris entre -2 et -6 m CM ("Carte Marine"), leur épaisseur atteint seulement quelques centimètres. Les campagnes de prospection au sonar à balayage latéral nous ont par ailleurs permis de préciser l'extension des unités 3 et 2 des sédiments holocènes qui affleurent actuellement (*fig. V-5b*, p. 266).



**Figure V-2.** Reconstitution d'une séquence sédimentaire type du comblement holocène de la Baie de Seine sud-orientale réalisée à partir de toutes les données collectées depuis 1999 sur la zone d'étude: carottages Küllenberg, vibrocarottages, descriptions lithologiques (photographies et radiographies au RX), analyses granulométriques, chronologie établie grâce à la palynologie et aux datations  $^{14}\text{C}$  (Garnaud et al., soumis). Grainsize: P - Peat, C&S: Coal and Silt, FS - Fine Sand, MS - Medium Sand, CS - Coarse Sand. Les flèches indiquent la position des deux épisodes régressifs au sein de l'unité 2.

## 1.2 La sédimentation fine depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle (moyen terme, échelle de temps 10<sup>2</sup>-10<sup>1</sup> ans)

### 1.2.1 Nature des fonds sédimentaires de la Baie de Seine orientale au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle

Les cartes réalisées par l'interprétation de données plomb suiffé du SHOM (1834, 1880, 1894 et 1913) fournissent les informations les plus anciennes à caractère morphosédimentaire dans l'est de la Baie de Seine. Elles montrent des modifications importantes de la couverture sédimentaire, avec des périodes d'envasement du même ordre que celles observées de nos jours. On appellera zone envasée une aire correspondant à un faciès décrit comme "vase" par les ingénieurs hydrographes. Au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, les sédiments fins se déposent dans les zones abritées de l'embouchure, là où les courants de marée sont les plus faibles. Ces dépôts sont cependant facilement remobilisables par la divagation des chenaux, responsable des cycles d'érosion/sédimentation entraînant des changements morphologiques de l'embouchure, distribuant et modifiant la répartition des stocks sédimentaires sableux et vaseux. Ainsi, les fonds sont peu envasés en 1834 (moins de 10%, *fig. II-3, p. 63*), alors que les cartes de 1880 et 1894 montrent un accroissement de la sédimentation fine avec une progression des surfaces envasées (sables vaseux et vases sableuses) de 70% (*fig. II-4, p. 65*) et 85% *fig. II-6, p. 67* de la surface totale prospectée. L'envasement accru de 1880-1894 est contemporain des premiers aménagements dans l'estuaire de la Seine (endiguement de 44 km entre la Mailleraye et la Risle); ils ont pu favoriser le déplacement de la zone de sédimentation fine plus vers l'aval. Toutefois, les anciens auteurs (Lavoine, 1885; Lennier, 1885) ayant étudié cet impact anthropique ne sont pas unanimes. L'évolution naturelle du système, où les conditions hydrologiques (houles et crues) au cours de ces années ont été très favorables aux déplacements des stocks sédimentaires à l'intérieur de l'estuaire, a aussi été mise en avant (Lavoine, 1885).

### 1.2.2 Variations des fonds sédimentaires de la Baie de Seine orientale depuis 1913

La carte du SHOM de 1913 (*fig. II-7, p. 68*) montre que les fonds marins situés à l'ouest de Deauville sont caractérisés par une couverture sédimentaire sableuse où les surfaces envasées qui représentaient 85% des fonds en 1894 n'en concernent plus que 15-20% en 1913. Cette évolution peut être mise en relation avec les grands aménagements de l'estuaire amont de la Seine (endiguements en 1890 des deux rives de l'estuaire jusqu'à la Risle), provoquant la migration de la sédimentation sableuse vers l'embouchure. Notons qu'en 1913, le port du Havre ouvre son actuel chenal d'accès vers l'ouest pour prévenir l'ensablement du précédent chenal, situé plus au sud.

Comme dans de nombreux estuaires (e.g. Lesueur *et al.*, 1996; Wolanski *et al.*, 2001), les grands aménagements de l'estuaire aval de la Seine ont surtout pris de l'importance au cours de la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. Ces différents aménagements ont diminué les

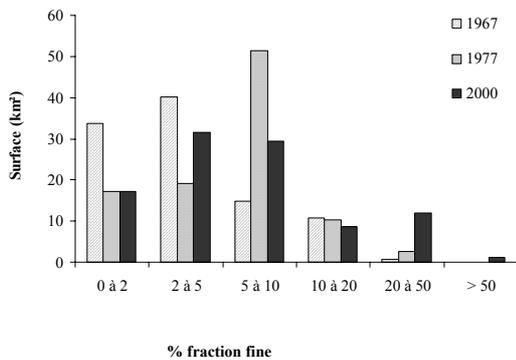
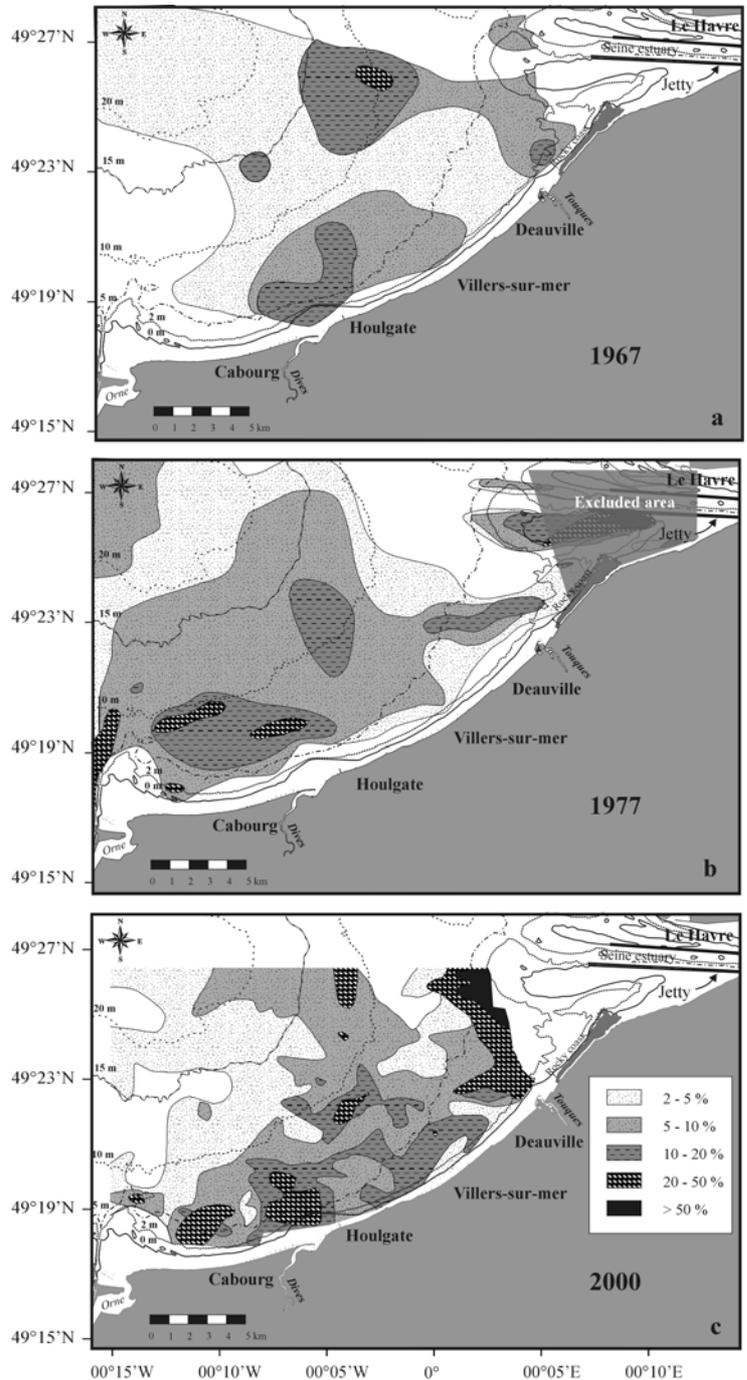
sections transverses et le volume oscillant (Avoine *et al.*, 1981) favorisant ici l'accroissement de la sédimentation fine dans les zones latérales de l'estuaire. Lesourd *et al.* (2001) ont montré que ces modifications morphologiques ont entraîné depuis 1980 une augmentation des teneurs en particules fines dans les sédiments superficiels de l'estuaire aval et de l'embouchure.

Les études entreprises depuis 1967 ont en particulier concerné les teneurs en particules fines (ou pélites,  $< 50 \mu\text{m}$ ) des sédiments superficiels. L'étude comparative des cartes des sédiments de la Baie de Seine sud-orientale a montré une évolution depuis des sables fins en 1967 ( $> 70\%$  de l'aire du domaine subtidal) vers un système dominé par des sédiments vaseux en 1977 (*fig. V-3*). En 2000, nos travaux montrent que la surface couverte par les vases sableuses (i.e.  $20-75\% < 50 \mu\text{m}$ ) a été multipliée par 5 ( $6 \text{ km}^2$  en 1977,  $31 \text{ km}^2$  en 2000, *fig. V-4*).

Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, les travaux de reconnaissance de la nature des fonds de l'ensemble de la Baie de Seine sud-orientale signalaient la présence d'une zone très envasée au large de Cabourg-Houlgate (Thoulet, 1908-1909; Sudry, 1911). Germain (1970) a retrouvé 60 ans plus tard cette surface apparaissant sans lien direct avec les apports solides de la Dives. Notre prospection sur le même zone au sonar à balayage latéral en 2000-2001 a permis de montrer que, entre -3 et -7 m CM, les argiles holocènes affleurent (*fig. V-5*) ou sont recouvertes seulement par 20 cm au maximum de sable actuel. Ce secteur, comme l'ensemble du domaine Ouest de notre zone d'étude, évolue dans un contexte érosif. La quantification de l'érosion pour la partie sud-est de la Baie de Seine a été estimée à  $0,85 \text{ cm.an}^{-1}$  pour la période 1874-1913 (Volmat, 1929). La réduction de l'ordre de 50 cm de la profondeur de sillons coquilliers, entre 1982-1983 (Auffret & d'Ozouville, 1986) et 2000 (notre étude), permet de proposer un taux d'érosion supérieur, de l'ordre de  $2,5 \text{ cm.an}^{-1}$  au cours des 20 dernières années. L'érosion est donc responsable de l'exhumation accrue des argiles holocènes avec leur mise en relief (*fig. V-5*). La large zone envasée au large de Cabourg peut ainsi être associée à l'érosion de ces mêmes argiles qui, lors des tempêtes, sont une source non négligeable de l'envasement de la Baie de Seine sud-orientale, comme cela avait été suggéré par Avoine (1986).

En résumé, les données sédimentologiques anciennes, comparées à celles extraites des cartes actuelles; font apparaître que les fonds de la Baie de Seine sud-orientale ont évolué en réponse tant aux modifications naturelles (divagation des chenaux: 1834-1894) qu'aux aménagements (anthropique: 1894/1913 - actuellement) de l'estuaire. La couverture sédimentaire composée essentiellement de sable au début du XIX<sup>ème</sup> siècle est ainsi passée à une tendance vaseuse en 1880-1894 puis sableuse en 1913-1967, pour aboutir depuis ces 20 dernières années à une sédimentation sablo-vaseuse ou vaseuse dans un système généralement en érosion (*fig. V-6a*).

**Figure V-3.** Carte de répartition des sédiments superficiels illustrant les variations spatio-temporelles de la fraction fine (< 50 µm) en Baie de Seine sud-orientale: (a) détail de la carte original des sédiments superficiels de la Manche (Larsonneur & Hommeril, 1967; Vaslet et al., 1978), (b) situation en août-septembre 1977 (Avoine, 1986), (c) situation de 2000 (Garnaud et al., soumis). →

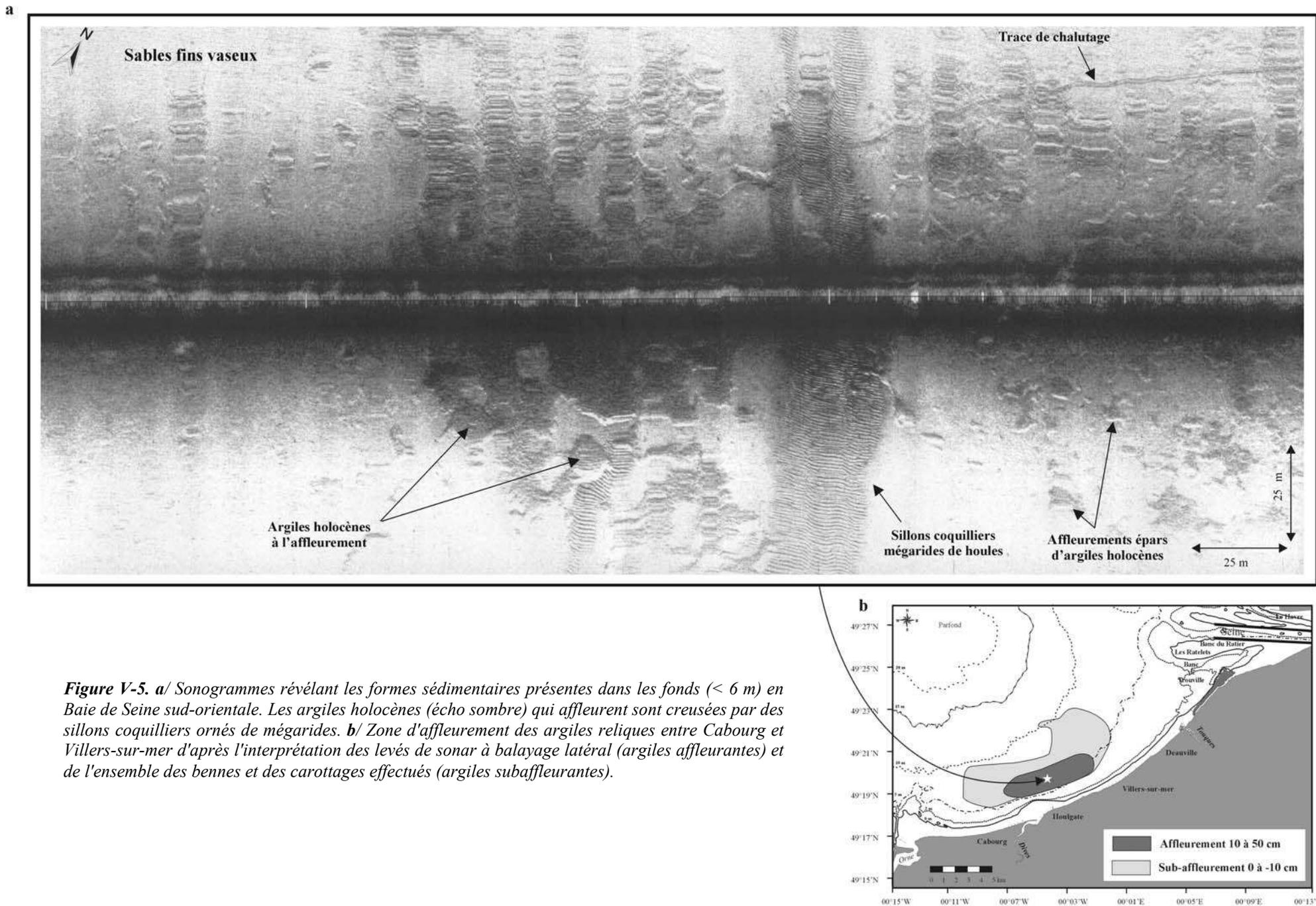


**Figure V-4.** Evolution des surfaces relatives à la teneur en fraction fine dans les sédiments superficiels en 1967, 1977 et 2000. La zone de l'embouchure de la Seine couverte en 1977 n'a pas été prise en compte dans ce calcul (Garnaud et al., soumis).

### 1.3 La sédimentation fine au cours des dernières années (court terme, échelle de temps < 10<sup>0</sup> ans)

#### 1.3.1 Evolution pluri-annuelle (1995-2000) et inter-annuelle - saisonnière

Le suivi sédimentologique sur le secteur de radiales de référence a permis de montrer que, pour le domaine subtidal de la Baie de Seine sud-orientale, la tendance générale a été à la diminution des fractions fines du sédiment superficiel au cours de la période 1999-2001 (fig. V-6b).



Par contre à l'échelle de la Baie de Seine sud-orientale, l'envasement à moyen terme est relativement important par rapport à la situation de référence de 1995 avec des teneurs moyennes en pélites passant de 3% en 1995 à 35% en 2000. Durant ces quelques années, il n'a pas été détecté d'évolution saisonnière avec un envasement estival comme l'avait observé Avoine (1986). La dynamique des sédiments faiblement envasés du secteur, étudiée par la méthode de Gao et Collins, nous fournit également des indications sur les sens de transport sédimentaire saisonniers: en hiver, les sables envasés sont acheminés vers les vasières subtidale et littorale, tandis que durant l'été ils sont dirigés vers l'est, en direction de l'estuaire, soulignant et confirmant le schéma complexe du transfert des particules.

### 1.3.2 "Crue estuarienne"

Malgré les régimes hydrologique ( $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en crue) et sédimentaire modérés d'un bassin versant fortement aménagé ( $0,4$  à  $1,3 \cdot 10^6 \text{ t} \cdot \text{an}^{-1}$  de charge solide), des épisodes d'envasement très significatifs peuvent être néanmoins enregistrés<sup>1</sup> dans les fonds adjacents à l'embouchure de la Seine. L'explication de la présence épisodique de ces vases a été recherchée dans un environnement où la diversité des sources de matériel fin et la complexité des processus dynamiques mis en jeu (combinaisons météorologiques, tidales et d'apports fluviaux) sont autant de paramètres à considérer.

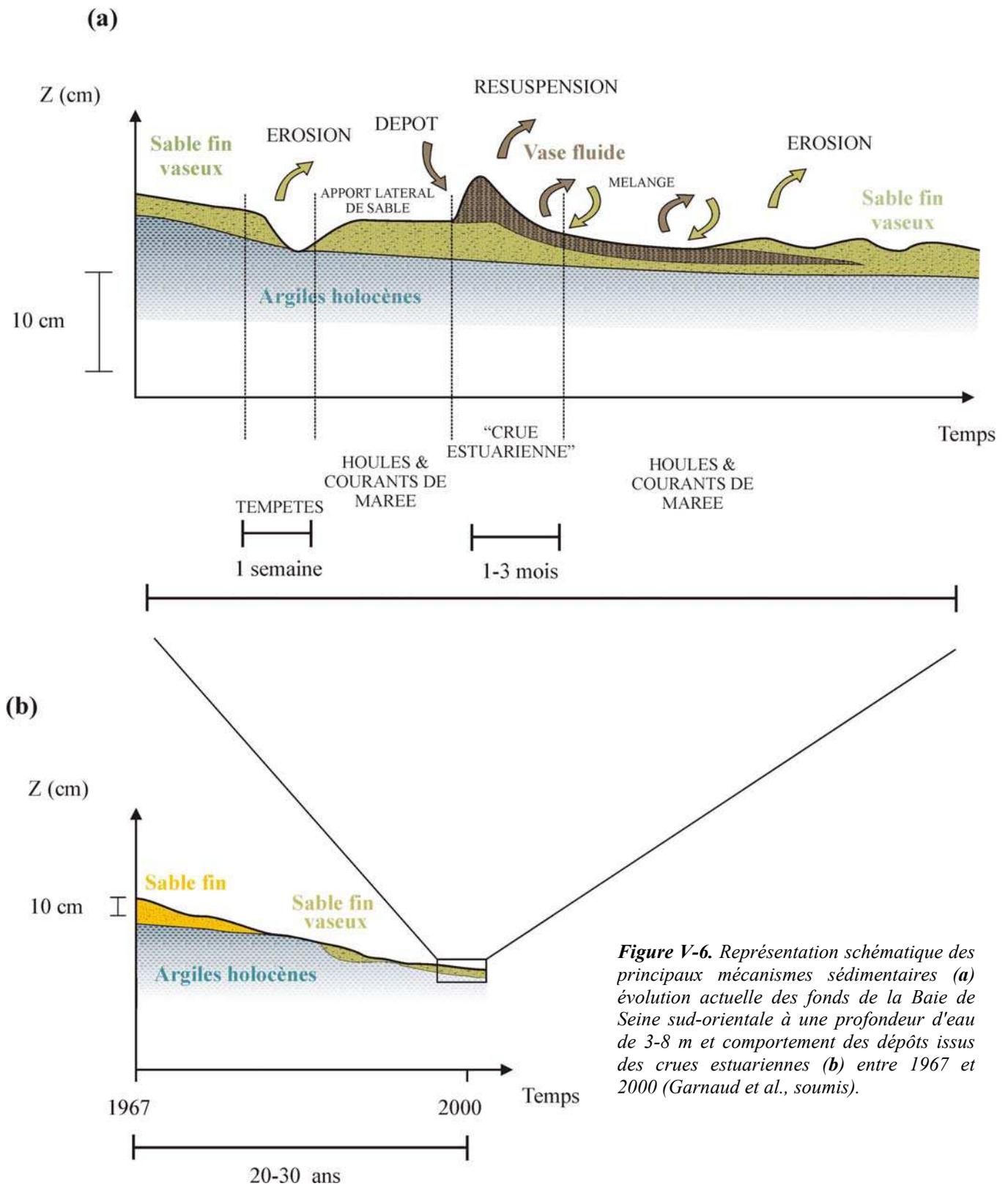
En Baie de Seine sud-orientale, les fluctuations importantes de la répartition des sédiments fins depuis le début de notre suivi saisonnier entre septembre 1998 et juin 2001 sont principalement liées à (1) des dépôts rapides et bien individualisés de placages de vase pouvant atteindre plusieurs centimètres sur les sables fins et moyens de la couverture sédimentaire superficielle actuelle et (2) à leur redistribution dans les mois suivant leur dépôt. Durant le maximum de crue en mars 1999 ( $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), de vastes placages de vase fluide de 1 à 3 cm, parfois même 5 cm, sont apparus dans les fonds subtidaux de la Baie de Seine sud-orientale. Cette couche de vase dépourvue de macrofaune épibenthique, distinguable des sédiments environnants et sous-jacents, a pour principales caractéristiques: son homogénéité (faciès transparent aux rayons X), sa faible densité sèche ( $< 1,2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), une moyenne granulométrique inférieure à  $20 \mu\text{m}$ , et une couleur sombre brun-noir.

A moyen et long terme, l'envasement général de la couverture sédimentaire est lié à de multiples sources d'apports de sédiments fins (e.g. érosion littorale, érosion argiles

---

<sup>1</sup> Dans le cas de fleuves ayant une charge solide modeste comprise entre  $10^6$  à  $10^8 \text{ t} \cdot \text{an}^{-1}$  (Nittrouer *et al.*, 1984-1985), il est parfois convenu qu'une grande partie des MES demeure piégée à l'intérieur des estuaires, le reste s'en échappant pour s'accumuler sur le plateau continental voisin (Nittrouer *et al.*, 1986). Ceci ne s'applique pas aux régimes soumis à des épisodes paroxysmiques de crue engendrant alors des expulsions massives de sédiments fins dépassant soudainement et largement les moyennes annuelles. Dans ces cas, ces événements exceptionnels produisent des bouleversements importants sur les environnements estuariens/fluviaux (e.g. fjord du Saguenay, Pelletier *et al.*, 1999; Locat *et al.*, 2001) ou marins (e.g. plateau continental de l'Eel river, Wheatcroft, 2000).

reliques); mais à une échelle de temps inférieure à la saison, la mise en place aussi rapide et importante de matériel implique que la source essentielle de ces sédiments fins provienne des apports de crue de la Seine. Les mesures hydro-sédimentaires montrent en effet que lors de fortes crues hivernales associées à des vives-eaux se produisent à basse mer des arrivées d'eau saumâtre chargée en MES en Baie de Seine sud-orientale. Ainsi, à plus de 15 km de l'embouchure, la turbidité peut atteindre  $55 \text{ mg.l}^{-1}$  avec une salinité ne dépassant pas 24 PSU.



Même si ces conditions hydrologiques de crues sont réunies chaque année, des placages bien individualisés de sédiments fins ne sont pas apparus depuis 1999 sur la zone. En mars 1999, la masse estimée de sédiments vaseux en recouvrement des sables sur le seul secteur des deux radiales de référence, représente 22 à 37% de la charge particulaire totale enregistrée à Poses durant cette crue ( $\sim 0,65 \cdot 10^6$  tonnes); cette masse atteindrait même la valeur totale du débit solide au barrage de Poses (situé à 160 km de l'embouchure, *fig. In3, p. 3*) correspondant à cette crue si on extrapole les calculs à l'ensemble de la vasière subtidale temporaire. Les seuls apports transitant dans l'estuaire depuis Poses vers l'aval ne peuvent tout expliquer. En effet, on estime que 1/5 à 1/3 des apports restent piégés dans l'estuaire amont (Guézennec, 1999), le reste parvenant à l'embouchure et étant expulsés en Baie de Seine voire en Manche orientale. La quantité importante de matériel sédimentaire déposée sur notre secteur d'étude implique que d'autres sources de sédiments fins qui ont été stockées au sein de l'estuaire en aval du barrage de Poses se sont ajoutées lors de cette crue aux sédiments originaires du bassin versant amont. Ces sources additionnelles de sédiments fins peuvent avoir pour origine:

- 1) le "décapage" des rares vasières intertidales latérales de l'estuaire de la Seine. Ces lieux de stockage des particules fines (Guézennec, 1999; Lesourd, 2000) sont limités à d'étroites banquettes vaseuses surtout sur les rives convexes de certains méandres (*point bars*). La plus grande aire de sédimentation fine reste la vasière Nord de l'embouchure, zone de stockage estival de vases. Lesourd *et al.* (2003) ont montré par exemple que la masse totale de sédiments érodés sur cette vasière lors d'une tempête de quelques jours pouvait atteindre celle du bouchon vaseux (i.e.  $0,2-0,4 \cdot 10^6$  t).
- 2) le bouchon vaseux translaté désormais en situation très aval dans l'estuaire du fait des aménagements (Avoine *et al.*, 1981), et dont le centre de gravité et la concentration en MES varient en fonction du débit fluvial et des conditions de marée (Avoine, 1981).
- 3) la crème de vase (nommée ici "vapie") en dépôt temporaire au fond des chenaux de l'embouchure, et tout particulièrement vers le débouché du chenal de navigation.

C'est lorsque survient une crue soutenue après une longue période de débits relativement faibles que ces sédiments intra-estuariens peuvent être remobilisés (vagues, tempêtes) puis intégrés à la charge solide apportée par le fleuve pour être finalement déplacés vers l'embouchure et expulsés hors de l'estuaire. Dans ces conditions, les sédiments se dispersent dans la Baie de Seine sous la forme d'un panache turbide en direction du nord mais également en longeant les côtes du Calvados. Nos mesures hydrosédimentaires ne permettent pas de répondre complètement aux modalités de déplacement des MES mais suggèrent toutefois un écoulement fortement turbide au voisinage du fond (de type hyperpycnal) directement depuis l'embouchure avec une déconnection possible avec le panache de surface.

C'est dans ce contexte réunissant à la fois un important stock de sédiments fins intra-estuariens et une crue soutenue (ici 190 jours) qu'ont pu se mettre en place des placages de vase fraîche en Baie de Seine sud-orientale lors de cet épisode que l'on peut qualifier de "crue estuarienne".

Depuis cet événement, les débits liquides ont atteint en 2000 et 2001 des valeurs maxima ( $> 2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ); pourtant aucun dépôt de vase analogue à celui de mars 1999 n'a été détecté sur le site de la vasière subtidale. La chronique hydrologique de la Seine et les études en cours dans le cadre du programme Seine-Aval, phase 2, permettent une interprétation: les débits soutenus depuis l'hiver 1998-99 n'ont pas permis au stock particulaire de l'estuaire de se reconstituer, dans un contexte où le bouchon vaseux est fréquemment situé très en aval, voire absent de l'estuaire, et où la vasière Nord d'embouchure se trouve dans une situation d'érosion ou au plus de très faible engraissement. Depuis l'événement de mars 1999, une diminution de l'envasement a été partout observée. Deux années après ces dépôts de vase fraîche, la tendance actuelle est au retour à une situation où les moyennes en fraction fine sur la zone de la vasière subtidale sont de l'ordre de 5-6% (moins de 3% en 1995). Toutefois, à l'échelle de la Baie de Seine sud-orientale, l'envasement à moyen terme progresse avec des teneurs moyennes atteignant 35% en 2000 contre 3% en 1995, car une partie des dépôts fins mis en place lors des crues est préservée par mélange avec les sables fins autochtones.

### 1.3.3 Evolution de la fraction fine en Baie de Seine orientale depuis 20 ans : envasement à moyen-terme des fonds subtidaux ?

Les cartographies de 1967, 1977 et 2000 de la répartition des teneurs en fraction fine dans les sédiments superficiels fournissent des états d'envasement "instantané" de la Baie de Seine sud-orientale. Au contraire, entre 1999 et 2000, le suivi régulier du secteur d'étude a montré qu'à une échelle de temps plus courte, inférieure à l'année, la nature des fonds diffère: c'est la variation à haute-fréquence de la couverture sédimentaire superficielle qui est ici concernée. Quel est alors l'impact des variations inter-annuelles dans l'évolution générale des fonds depuis ces dernières décades ? Quelques éléments permettent de penser que les fonds subtidaux s'envasent à une échelle de temps indépendante des variations à haute-fréquence reconnues dans notre étude (e.g. crues, houles, tempêtes, *figs. V-6b et V-7*). Bien que les aménagements de l'estuaire réduisant l'espace intra-estuarien disponible, aient entraîné le déplacement de la sédimentation fine vers le domaine subtidal - ceci conformément à la tendance à l'envasement actuel de l'embouchure de la Seine (Lesourd, 2000) - il convient aussi de se demander si les apports en particules fines ne se sont pas également accrus au cours du temps. Depuis la fin des années 1970, nous avons montré que les épisodes de crue sont 2,5 fois plus nombreux que pendant la période précédente (1941-1977). Des travaux récents montrent l'impact des variations du climat sur

l'augmentation des épisodes de crue et donc des apports de sédiments fins de différents fleuves mondiaux sur les plates-formes (Rîmbu *et al.*, 2002; Sommerfield *et al.*, 2002). Dans l'estuaire de la Seine, les multiples aménagements ont incontestablement eu une influence sur l'envasement des fonds subtidaux mais ont fortement occulté le signal climatique. Si la tendance à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des crues se confirme à l'avenir, un accroissement de l'envasement résiduel sera très vraisemblablement observé sur l'ensemble de la Baie de Seine orientale du fait d'apports importants et continus de particules fines.

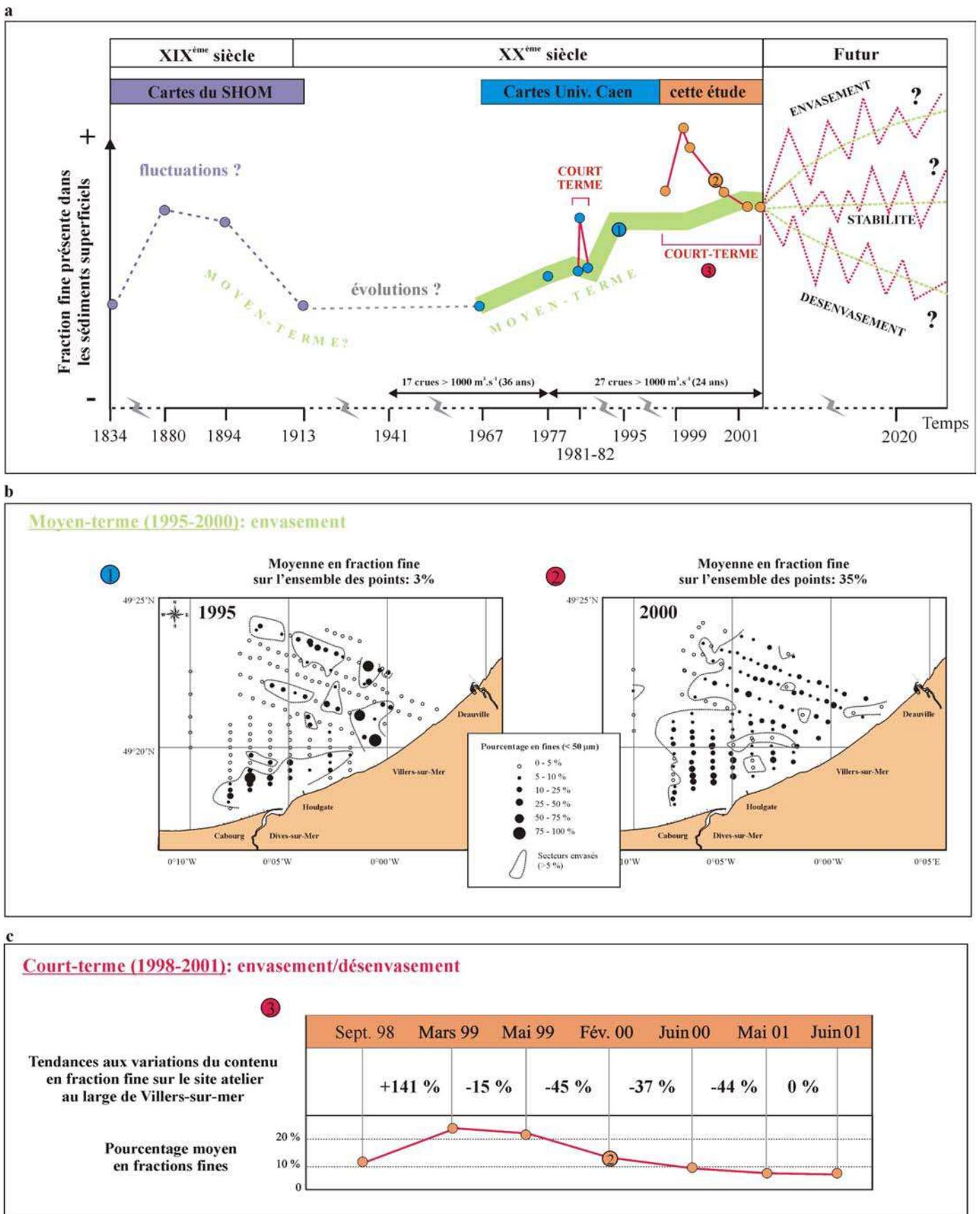
## 2. Conclusions générales

Les investigations menées depuis 1999 en Baie de Seine sud-orientale ont montré qu'aux faibles profondeurs (< 10 m) une partie du domaine subtidal pouvait être recouverte par des placages diffus de vases souvent fluides aux contours mal connus et fluctuants. Les conséquences actuelles de ces dépôts fins (asphyxie de la faune benthique, dégradation de la qualité des eaux) ou futures (migration des zones de pêche, envasement des basses plages) justifient d'avoir entrepris cette étude.

Nous avons cherché à comprendre les variations de la sédimentation fine à partir de l'acquisition de données sédimentologiques, acoustiques et hydrosédimentaires lors de six campagnes en mer réalisées de 1999 à 2001. Leur exploitation a permis (1) de caractériser les variations de l'envasement à long terme en comparant nos données avec celles obtenues par la méthode du plomb suiffé au XIX<sup>ème</sup> siècle et par l'Université de Caen en 1967, 1977 et 1995 (2) de compléter notre compréhension du fonctionnement hydrosédimentaire du système estuaire-Baie de Seine et (3) de caractériser et de comprendre la mobilité de la fraction pélitique à l'échelle saisonnière (i.e. à court terme) et pluri-annuelle (i.e. à moyen terme) en utilisant des méthodes d'investigation directes (échantillonnage de sédiments superficiels, sonar à balayage latéral) ou indirectes (application de la méthode de Gao et Collins). La mise en relief de sédiments reliques sur une partie de ces fonds, nous a également conduit à en réaliser l'étude sédimentologique et chronostratigraphique.

### Figures sédimentaires originales (sonar à balayage latéral)

Le sonar à balayage latéral s'est révélé un outil très précieux dans ces fonds subtidaux en permettant de reconnaître rapidement les principales caractéristiques morphosédimentaires des fonds et de localiser les zones en érosion. Les fonds subtidaux de la Baie de Seine sud-orientale, décrit précédemment comme peu propice à la présence de formes sédimentaires, se sont révélés être un domaine parcouru par un ensemble de figures variées, pour certaines récentes: sillons coquilliers (150 répertoriés), voiles sableux, zones à



**Figure V-7.** a/ Synthèse des résultats obtenus sur l'évolution de la fraction fine dans les sédiments superficiels de la Baie de Seine sud-orientale depuis 1834 à différentes échelles de temps et projection dans l'avenir: période 1834-1913 - cartes du SHOM (●); 1967-1982 - cartes de l'université de Caen (●); 1998-2001, cette étude (●). b/ Evolution à **moyen-terme** de la fraction fine entre Cabourg et Deauville pour la période 1995-2000, c/ Evolution à **court-terme** (1998-2001) de la fraction fine sur la radiale atelier FL22-FL37.

mégarides, queues de comète, moulières et micro-reliefs (30-60 cm) formés d'argiles holocènes. Entre -5 à -7 m CM, ces argiles ont une extension de l'ordre de 15 km<sup>2</sup>. Cette observation conduit à considérer les argiles holocènes en tant que source de silts et d'argiles dans l'alimentation des fonds à moyen terme. L'évolution des sillons coquilliers, depuis leur première reconnaissance (1982-83), permet de proposer un taux d'érosion du secteur au large de Cabourg de l'ordre de 2,5 cm.an<sup>-1</sup> au cours des 20 dernières années.

### **Transport sédimentaire (méthode de Gao et Collins)**

L'étude des transports résiduels des sables envasés par l'application de la méthode de Gao et Collins est une approche originale et nouvelle dans cet environnement où la couverture sédimentaire évolue rapidement. Les résultats obtenus montrent des sens de transits sédimentaires saisonniers en adéquation avec le fonctionnement global du système estuaire-Baie de Seine: flux sortants en hiver vers différentes zones de convergence, et flux entrants en période d'étiage.

### **Origine des particules fines**

L'étude de l'envasement de la Baie de Seine sud-orientale nous a conduit à poser la question de l'origine des particules fines. Les envasements épisodiques consécutifs aux crues estuariennes ont pour source essentielle les sédiments apportés de l'estuaire. Par contre, de multiples sources alimentent plus continuellement le stock de particules fines correspond à l'envasement à moyen terme (séculaire à pluri-décennal) de la Baie de Seine. Ainsi, la présence significative d'argiles interstratifiées dans les sédiments envasés actuels de la couverture sédimentaire nous a permis d'envisager comme source d'apports les sédiments argileux fossiles, à la fois les dépôts holocènes au large d'Houlgate et les falaises callovo-oxfordiennes du Calvados. Par ailleurs, les mesures de radionucléides artificiels <sup>60</sup>Co/<sup>137</sup>Cs montrent des valeurs anormalement basses sur le site de la vasière subtidale dues à l'incorporation d'une source sédimentaire aux teneurs plus faibles, liée soit à des apports particuliers de la Seine soit à l'érosion littorale ou des argiles reliques subtidales.

### **Fonctionnement du système estuaire-Baie de Seine**

L'étude menée en Baie de Seine sud-orientale s'intègre aux résultats obtenus lors de travaux précédents ou actuels (Seine-aval II), au sein de programmes spécifiques au système estuarien ou de la Baie de Seine (PNOC-PNEC Baie de Seine, Seine Aval). L'étude de la couverture sédimentaire de l'embouchure de Seine (Lesourd, 2000; Lesourd *et al.*, 2003) et du domaine nord-oriental face à Antifer (Lesueur *et al.*, 2002) montre que les teneurs en fraction fine des sédiments superficiels répondent aux fluctuations saisonnières

des apports de la Seine. Cependant, les envasements sont parfois déphasés d'une saison: si dans la Baie de Seine nord-orientale, les vases sont plus présentes en étiage, cette tendance n'a pas été observée dans la Baie de Seine sud-orientale. Nos études montrent que les envasements s'y produisent surtout lors d'apports à caractère événementiel selon des modalités propres à chaque site, dans un environnement macrotidal ouvert aux vagues où les particules fines sont extrêmement mobiles (Garnaud *et al.*, 2002; Lesueur *et al.*, 2002; Lesourd *et al.*, 2003).

En résumé, l'une des spécificités de notre zone d'étude est d'être de nos jours à la fois le siège d'une sédimentation fine, épisodique, mais aussi un site en érosion depuis au moins 100 ans caractérisé à long terme par l'exhumation et la mise en relief des sédiments fins holocènes sous-jacentes; les principales zones d'accrétion se limitent à quelques portions du littoral (e.g. Deauville), et aux prismes d'embouchure des fleuves, principalement de la Seine. Dans ce système érosif, on note toutefois (1) à l'échelle pluri-décennale (1967 à 2002) et pluri-annuelle (1995-2000) l'envasement progressif des fonds subtidaux et (2) à l'échelle de la saison, des fonds marins dominés par des "crues estuariennes" apportant un dépôt de vase fluide. Le fonctionnement hydrosédimentaire saisonnier et pluri-annuel de la zone d'étude s'étendant sur cette partie de la plate-forme interne montre qu'elle peut être considérée comme la partie distale du système estuarien macrotidal de la Seine.

### 3. Perspectives

Comme pour tous les milieux côtiers actuels, la compréhension des mécanismes complexes de l'envasement de la Baie de Seine sud-orientale depuis le cycle de marée semi-diurne jusqu'à l'échelle de temps pluri-annuelle requiert des moyens à la mer importants et un long suivi hydrosédimentaire. Ainsi, les six mesures en points fixes réalisées au cours d'un cycle de marée ont en particulier montré la nécessité d'une telle stratégie pour l'étude des masses d'eaux et des matières en suspension, combinant diverses conditions de marée et de débits fluviaux. Toutefois, un suivi en continu à une échelle pluri-annuelle, par la mise en place d'une station benthique mesurant les paramètres hydrodynamiques (courants et houles), morphologiques (variations du fond) et sédimentologiques (turbidité), serait indispensable pour l'interprétation des variations à court terme de la couverture sédimentaire. Ce suivi régulier permettrait aussi de faire face à l'occurrence d'événements peu prévisibles, qu'il s'agisse de forts apports vaseux comme durant l'hiver 1999 ou de tempêtes. En calculant les vitesses orbitales sur le fond par la mesure *in situ* des houles (Castaing, 1981), il serait possible de connaître la relation entre l'agitation liée à la houle et les remises en suspension des sédiments sur le fond, en particulier après les dépôts de vase fraîchement déposés lors d'une "crue estuarienne".

Dans l'étude de ces phénomènes, il faut adopter une stratégie d'étude particulière (dite "*rapid response*") permettant de se rendre rapidement sur les sites d'étude, procédure actuellement incompatible avec la programmation des missions de navires un an à l'avance.

Le schéma de fonctionnement général du système estuaire-Baie de Seine dégagé à l'issue de cette étude met ainsi l'accent sur l'importance de l'interconnexion entre les programmes pluridisciplinaires de recherche, ici dans le continuum "Seine-Manche" (Piren-Seine, Seine-Aval, PNOC-PNEC Baie de Seine, Fluxmanche). Ce travail a permis de mettre en évidence le rôle majeur des crues hivernales, dites "estuariennes", dans le dépôt rapide de vase fraîche d'épaisseur pluri-centimétrique. Mais ces dépôts apparaissent à la suite d'une combinaison de conditions bien spécifiques qui ne sont pas réunies chaque année. Existe-t-il alors une récurrence, un cycle dans la mise en place de ces dépôts ? L'étude menée au cours de ces quatre années ne permet pas de répondre à cette question et seul un suivi sur une plus longue durée pourrait fournir une réponse. Toutefois, les débits soutenus et les crues qui se succèdent depuis mars 1999 sont peu favorables à des dépôts importants en Baie de Seine. Il faudra attendre un retour à des débits plus modérés permettant la reconstitution du stock intra-estuarien avant de s'attendre à pouvoir observer de nouveau de tels dépôts vaseux bien individualisés. Pour prédire ces types d'apports, il sera alors nécessaire de caractériser le cycle journalier, saisonnier et annuel des MES dans l'estuaire aval, et de paramétrer les conditions propices aux fortes expulsions de MES stockées en aval de l'estuaire qui intègrent:

- la chronique du régime fluvial de la Seine, afin de caractériser les différents types de crues en fonction de leur débit, durée, fréquence et des apports en MES. Les données de débits liquides et solides existent au niveau de Poses, mais elles font défaut dans l'estuaire aval. Une approche récente développée par Javelle (2001) sur la caractérisation des régimes de crue par un modèle débit-durée-fréquence pourrait être appliquée ici pour décrire les crues.
- la présence d'un stock particulière au niveau des vasières latérales de l'embouchure de la Seine ou de vase fluide dans les chenaux, susceptible d'être remobilisé lors des crues estuariennes (dans l'estuaire de la Seine, la crème de vase a été peu étudiée).

Une meilleure évaluation des volumes stockés, expulsés et partiellement déposés sur le secteur des vasières subtidales doit passer par une quantification plus précise de la masse sédimentaire transitant entre l'embouchure et la Baie de Seine. A ce titre, une étude complète sur les sources sédimentaires et la recherche de marqueurs géochimiques distincts entre chacune d'entre elles permettrait d'évaluer les différents stocks de sédiments fins impliqués.

L'étude entreprise sur les transports résiduels en Baie de Seine sud-orientale pourrait être complétée par une modélisation numérique et une quantification des volumes

réellement mis en jeu avec l'utilisation de plusieurs formules de transport solide, dont par exemple celle de Gadd *et al.* (1978) déjà utilisée avec succès dans différents environnements (Ehrhold, 1999; Bastos *et al.*, 2002) et couplée au calcul de la contrainte de cisaillement sur le fond (SEDTRANS92, Li & Amos, 1995; Li *et al.*, 1997; Li & Amos, 1999).

D'une manière plus générale, la poursuite du suivi de la couverture sédimentaire des fonds subtidaux sur plusieurs années permettrait de prédire l'impact et le temps de retour des processus paroxysmiques entraînant des dépôts de vase en Baie de Seine sud-orientale et d'apprécier l'impact des nouvelles implantations portuaires à l'embouchure de la Seine sur ces fonds subtidaux.

## Bibliographie du chapitre V

- Auffret, J.-P. & d'Ozouville, L.** (1986). Apports de l'imagerie fournie par le sonar à balayage latéral à la connaissance de la dynamique sédimentaire en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 201-209.
- Avoine, J.** (1981). L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 236 p.
- 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, J.P., Nichols, M., Salomon, J.C. & Larsonneur, C.** (1981). Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France: effect of man-made modification on estuary-shelf sedimentology. *Marine Geology* 40, 119-137.
- Bastos, A.C., Kenyon, N.H. & Collins, M.** (2002). Sedimentary processes, bedforms and facies, associated with a coastal headland: Portland Bill, Southern UK. *Marine Geology* 187 (3-4), 235-258.
- Castaing, P.** (1981). Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes. Cas de la Gironde. *Thèse d'état, Université de Bordeaux I*, 530 p.
- Ehrhold, A.** (1999). Dynamique de comblement d'un bassin sédimentaire soumis à un régime mégatidal: exemple de la Baie du Mont-Saint-Michel. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen, Caen*, 294 p.
- Gadd, P.E., Lavelle, J.W. & Swift, D.J.P.** (1978). Estimated of sand transport on the New York shelf using near-bottom current meter observations. *Journal of Sedimentary Petrology* 48, 239-252.
- Garnaud, S., Lesueur, P., Lesourd, S., Garlan, T., Clet, M. & Brun-Cottan, J.-C.** (soumis). Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner shelf (eastern Bay of the Seine, France). *Marine Geology*.
- Garnaud, S., Lesueur, P., Lesourd, S., Poupinet, N. & Brun-Cottan, J.-C.** (2002). Caractérisation des variations lithologiques saisonnières des sédiments de la Baie de Seine orientale; impact des crues de la Seine (France). *Comptes Rendus Geoscience* 334, 323-330.
- Germain, P.** (1970). Etude sédimentologique et hydrologique de l'estuaire de la Dives et du littoral adjacent (Cabourg-Houlgate). *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 77 p.
- Guézennec, L.** (1999). Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviatile d'un estuaire macrotidal: l'exemple de l'estuaire de la Seine (France). *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Rouen*, 240 p.
- Javelle, P.** (2001). Caractérisation du régime des crues: le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG)*, 277 p.
- Larsonneur, C.** (1977). De la Baie de Seine à l'estuaire de la Seine, histoire du Quaternaire marin. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 9-19.
- Larsonneur, C. & Hommeril, P.** (1967). Sédiments et sédimentation dans la partie orientale de la Baie de Seine. *Extrait de la revue des sociétés savantes de Hautes-Normandie* 47, 45-75.
- Lavoine, E.** (1885). La Seine maritime et son estuaire. Encyclopédie des travaux publics. *Baudry et Cie & Leroux, E.* (Eds), 311 p.
- Lefebvre, D., Huault, M.-F., Guyader, J., Giresse, P., Hommeril, P. & Larsonneur, C.** (1974). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine: synthèse sédimentologique, stratigraphique et paléogéographique. *Bulletin d'Information Géologique du Bassin de Paris* 39, 27-36.
- Lenner, G.** (1885). L'estuaire de la Seine. Mémoires, notes et documents pour servir à l'étude de l'estuaire de la Seine. *Hustin imprimerie, Le Havre*, 2 vol. et 1 atlas
- Lesourd, S.** (2000). Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal: zoom temporel du siècle à l'heure; application à l'estuaire de la Seine. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 280 p.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Auffret, J.P., Poupinet, N. & Laignel, B.** (2001). Morphosedimentary evolution of a macrotidal estuary subjected to human impact; the example of the Seine (France). *Estuaries* 24 (6B), 940-949.

- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Garnaud, S. & Poupinet, N.** (2003). Seasonal variations in the characteristics of superficial sediments in a macrotidal estuary (the Seine inlet, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 56, 1-14.
- Lesueur, P., Garnaud, S., Méar, Y., Lafite, R., Poizot, E., Brun-Cottan, J.-C. & Dupont, J.-P.** (2002). Distribution et variabilité des sédiments fins en Baie de Seine orientale. *Bilan du Chantier Baie de Seine, Réunion du Conseil Scientifique*, Dinard.
- Lesueur, P., Tastet, J.-P. & Marambat, L.** (1996). Shelf mud fields formation within historical times: examples from offshore the Gironde estuary, France. *Continental Shelf Research* 16 (4), 1849-1870.
- Li, M.Z. & Amos, C.L.** (1995). SEDTRANS92: a sediment transport model for continental shelves. *Computers & Geosciences* 21, 533-554.
- Li, M.Z., Amos, C.L. & Heffer, D.E.** (1997). Boundary layer dynamics and sediment transport under storm and non-storm conditions on the Scotian Shelf. *Marine Geology* 141, 157-181.
- Li, M.Z. & Amos, C.L.** (1999). Field observations of bedforms and sediment transport thresholds of fine sand under combined waves and currents. *Marine Geology* 158, 147-160.
- Locat, J., Hill, P., Long, B., Simpkin, P., Kammerer, E. & Sanfaçon, R.** (2001). The morphological signature of natural disasters in the upper Saguenay Fjord area, Québec, Canada. In: Couture, R. & Evans, S.G. (Editors). *Comptes rendus de la 53<sup>e</sup> Conférence Canadienne de Géotechnique*, Montréal, Québec, 15-18 octobre 2000, 145-151.
- Morzadec-Kerfourn, M.T.** (1995). Coastal changes in the armorican massif (France) during the Holocene. *Journal of Coastal Research* 17, 197-203.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., Kuehl, S.A., McKee, B.A. & Thorbjarnarson, K.W.** (1984-1985). Some questions and answers about the accumulation of fine-grained sediment in continental margin environments. *Geo-Marine Letters* 4, 211-213.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., Kuehl, S.A. & McKee, B.A.** (1986). Association of sand with mud deposits accumulating on continental shelves. In: Knight, R.J. & McLean, J.R. (Editors). *Shelf Sands and Sandstones*. Canadian Society of Petroleum Geologists, 17-25.
- Pelletier, E., Deflandre, B., Nozais, C., Tita, G., Gagné, J.-P., Desrosiers, G. & Mucci, A.** (1999). Crue éclair de juillet 1996 dans la région du Saguenay (Québec). 2. Impacts sur les sédiments et le biotope de la baie des Ha!Ha! et du fjord du Saguenay. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56, 2136-2147.
- Pontee, N.L., Tastet, J.-P. & Massé, L.** (1998). Morpho-sedimentary evidence of Holocene coastal changes near the mouth of the Gironde and on the Medoc peninsula, SW France. *Oceanologica Acta* 21 (2), 243-261.
- Rĩmbu, N., Boroneant, C., Buta, C. & Dima, M.** (2002). Decadal variability of the Danube river flow in the lower basin and its relation with the North Atlantic Oscillation. *International Journal of Climatology* 22 (10), 1169-1179.
- Sommerfield, C.K., Drake, D.E. & Wheatcroft, R.A.** (2002). Shelf record of climatic changes in flood magnitude and frequency, north-coastal California. *Geology* 30 (5), 395-398.
- Sudry, M.L.** (1911). Les sédiments marins des côtes du Calvados. *Comptes rendus du congrès des sociétés savantes de Paris et des départements*. Imprimerie Nationale, Caen, 25-32.
- Thoulet** (1908-1909). Etude des fonds marins de la Baie de Seine. *Annales hydrographiques*, 1-28.
- Vaslet, D., Larsonneur, C. & Auffret, J.-P.** (1978). Carte des sédiments superficiels de la Manche au 1:500 000<sup>e</sup> et notice explicative. B.R.G.M, Orléans, 17 p.
- Volmat, M.** (1929). Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. 22<sup>ème</sup> cahier de la recherche hydrographique sur le régime des côtes, 97-135.
- Wheatcroft, R.A.** (2000). Oceanic flood sedimentation: a new perspective. *Continental Shelf Research* 20, 2059-2066.
- Wolanski, E., Moore, K., Spagnol, S., D'Adamo, N. & Pattiaratchi, C.** (2001). Rapid, human-induced siltation of the macrotidal Ord River Estuary, Western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 53, 717-732.

## **Bibliographie thématique**

---

## Bibliographie thématique

---

Baie et estuaire de Seine.....	281
Dépôts holocènes en Normandie.....	287
Dépôts des plateaux continentaux mondiaux et processus.....	288
Figures sédimentaires (sillons, mégarides) et systèmes de reconnaissance.....	293
Transports sédimentaires Méthode de Gao et Collins et applications.....	295
Climatologie.....	296
Autres.....	296
Livres généraux.....	297

---

### Baie et estuaire de Seine

- Alduc A. & Auffret, J.P.** (1979). Carte bathymétrique du bed-rock de la manche orientale. *Bulletin de la Société Limnène de Normandie* 107, 99.
- Alzieu, C.** (1999). Dragages et environnement marin: état des connaissances, 224 p.
- Aminot, A., Kerouel, R. & Mauvais, J.L.** (1986). Les éléments nutritifs en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 24-26 avril 1985, 289-296.
- Aminot, A., Guillaud, J.-F. & Kérouel, R.** (1997). La Baie de Seine: hydrologie, nutriments et chlorophylle (1978-1994). *Repère Océan*, 14. IFREMER, Brest, 148 p.
- Aqua-Fact International Service Ltd.** (1995). SPI mapping of the Baie de Seine in the English Channel. 25 p.
- Auffret, J.P. & Larsonneur, C.** (1975). Le modèle sédimentaire de la Manche orientale. *XI<sup>me</sup> Congrès International de Sédimentologie*, Nice, 33-39.
- Auffret, J.-P. & Larsonneur, C.** (1977). Paléovallées et bancs sableux entre l'estuaire de la Seine et le Nord-Cotentin. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 21-33.
- Auffret, J.-P., Alduc, D., Larsonneur, C. & Smith, A.J.** (1980). Cartographie du réseau des paléovallées et de l'épaisseur des formations superficielles meubles de la manche orientale. *Annales de l'Institut Océanographique* 56, 21-35.
- Auffret, J.P., Walker, P. & D'Ouzouville, L.** (1984). Le sonar à balayage latéral et ses applications à l'étude des transports sédimentaires en Manche. *XVIII<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique*. Société Hydrotechnique de France, Marseille, I.14.1-I.14.7.
- Auffret, J.-P. & D'Ouzouville, L.** (1986). Apports de l'imagerie fournie par le sonar à balayage latéral à la connaissance de la dynamique sédimentaire en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 201-209.
- Auffret, J.P., Guegueniat, P., Lepy, M.C., Patry, J.P. & Saur, H.** (1986). Les radionucléides émetteurs gamma dans les sédiments de l'estuaire de l'Orne pendant les années 1977-1983. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 24-26 avril 1985, 273-282.
- Auffret, J.-P., Augris, C., Cabioch, L. & Koch, P.** (1992). Sillons graveleux aux abords de la Baie de Morlaix. *Annales de la Société Géologique du Nord* 1 (2<sup>ème</sup> série), 143-147.
- Auzel, M. & Bourcart, J.** (1950). Sur l'érosion de la plage de Deauville pendant le printemps 1950. *Cahiers Océanographiques* II, 379-386.
- Avoine, J.** (1981). L'estuaire de la Seine: sédiments et dynamique sédimentaire. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 236 p.
- Avoine, J.** (1984). Evolution hydrodynamique et sédimentaire de l'estuaire de la Seine. *L'estuaire de la Seine, enjeux écologiques et économiques. Actes de colloques*, Le Havre, 53-67.
- Avoine, J.** (1986). Evaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de la Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 61-68.

- Avoine, J.** (1986). Sediment exchanges between the Seine estuary and its adjacent shelf. *Journal of the Geological Society, London* 144, 135-148.
- Avoine, J.** (1992). Etude d'impact de la deuxième passerelle transmanche de Caen-Ouistreham - Etude de la dispersion des rejets de dragages à l'aide de traceurs fluorescents. *Rapport DDE Calvados*, 70 p.
- Avoine, J.** (1994). Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. *Rapport d'étude, IFREMER - Port autonome du Havre*, Brest, 153 p.
- Avoine, J., Allen, J.P., Nichols, M., Salomon, J.C. & Larssonneur, C.** (1981). Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France: effect of man-made modification on estuary-shelf sedimentology. *Marine Geology* 40, 119-137.
- Avoine, J., Crevel, L., Dubrulle, L., Boust, D. & Guegeniat, P.** (1984). Sédiments et dynamique sédimentaire en Baie de Seine. *XVIII<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique*. Société Hydrotechnique de France, Marseille, I.3.1-I.3.8.
- Avoine, J., Larssonneur, C., Caillot, A., Hoslin, R., Massias, J. & Quesney, M.** (1984). Mise en évidence des mouvements sédimentaire en Baie de Seine à l'aide de traceurs radioactifs - Contribution à l'étude du comblement de l'estuaire de la Seine. *XVIII<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique*. Société Hydrotechnique de France, Marseille, I.2.1-I.2.8.
- Avoine, J., Caillot, A., Hoslin, R., Larssonneur, C., Massias, J. & Quesney, M.** (1986). Contribution des traceurs radioactifs à l'étude des mouvements sédimentaires en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 211-218.
- Avoine, J. & Larssonneur, C.** (1987). Dynamics and behaviour of suspended sediment in macrotidal estuaries along the south coast of the English Channel. *Continental Shelf Research* 7 (11/12), 1301-1305.
- Avoine, J., Texier, H. & Quillard, J.** (1993). Les rejets de dragage du port Caen-Ouistreham. Impacts hydrosédimentaires et géochimiques. *Université de Caen*, 9 p.
- Avoine, J., Lesueur, P. & Rouault, T.** (1996). Evolution morphologique et couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Actualisation et fluctuations. *Rapport programme Seine-Aval 1995/FIN-1, Thème Hydrodynamique et transport sédimentaire*, 2-20.
- Bailly du Bois, P., Rozet, M., Thorat, K. & Salomon, J.C.** (1997). Improving knowledge of water-mass circulation in the English Channel using radioactive tracers. *Radioprotection* 32 (C2), 63-69.
- Bailly du Bois, P. & Guéguénat, P.** (1999). Quantitative assessment of dissolved radiotracers in the English Channel: Sources, average impact of la Hague reprocessing plant and conservative behaviour (1983, 1986, 1988, 1994). *Continental Shelf Research* (19), 1977-2002.
- BIOTEC** (2002). Etude sur les possibilités d'utilisation des techniques douces appliquées à la protection et la réhabilitation des berges de la Seine entre Rouen et Tancarville. *DIREN Haute-Normandie*, 75 p., <http://www.environnement.gouv.fr/haute-normandie/etudes/bergesSeine.pdf>
- Brunet, C., Brylinski, J.M., Bodineau, L., Thoumelin, G., Bentley, D. & Hilde, D.** (1996). Phytoplankton dynamics during the spring bloom in the south-eastern English Channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 43, 469-483.
- Brylinski, J.M., Lagadeuc, Y., Gentilhomme, V., Dupont, J.-P., Lafite, R., Dupeuble, P.-A., Huault, M.-F., Auger, Y., Puskaric, E., Wartel, M. & Cabioch, L.** (1991). Le fleuve côtier: un phénomène hydrologique important en Manche Orientale. Exemple du Pas de Calais. *Oceanologica Acta* 11, 197-203.
- Bourcart, J.** (1939). Sur les vasières des estuaires de la Manche. *Comptes rendus sommaire des séances de la société géologique de France*, 6, 73-74.
- Boust, D.** (1996). Utilisation des radionucléides naturels et artificiels pour l'étude et la quantification de processus hydrosédimentaires dans l'estuaire de la Seine. *Rapport programme Seine-Aval 1995/FIN-1, Thème Hydrodynamique et transport sédimentaire*, 65-77.
- Boust, D.** (1997). Distribution and inventory of some naturally-occurring and artificial radionuclides on coarse-grained sediments of the channel. *Final report of FLUXMANCHE, hydrodynamics and Biogeochemical Processes and Fluxes in the channel*, 90-99.
- Boust, D.** (1999). Distribution and inventories of some artificial and naturally occurring radionuclides in medium to coarse-grained sediments of the channel. *Continental Shelf Research* (19), 1959-1975.
- Boust, D., Colin, C., Leclerc, G. & Baron, Y.** (1997). Distribution and transit times of plutonium-bearing particles throughout the Channel. *Radioprotection* 325 (C2), 123-128.
- Boust, D., Lesueur, P., Rozet, M., Solier, L. & Ficht, A.** (2002). The dynamics of <sup>60</sup>Co-labelled sediment particles in the Seine estuary. *Actes du congrès ECORAD, 3-7 sept 2001, Radioprotection - Colloques*, Aix en Provence, France, C1-749/ C741-754.
- Brenon, I. & Le Hir, P.** (1999). Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): identification of formation processes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49, 525-544.

- Brenon, I. & Le Hir, P.** (1999). Simulation de bouchon vaseux dans l'estuaire de la Seine: capacité et limites d'un modèle bidimensionnel horizontal. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris* 328 (Série2a), 327-332.
- Brunet, C., Brylinski, J.M., Bodineau, L., Thoumelin, G., Bentley, D. & Hilde, D.** (1996). Phytoplankton dynamics during the spring bloom in the south-eastern English Channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 43, 469-483.
- Brylinski, J.M., Brunet, C., Bentley, D., Thoumelin, G. & Hilde, D.** (1996). Hydrography and phytoplankton biomass in the eastern English Channel in spring 1992. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 43, 507-519.
- Crevel, L.** (1983). Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la Baie de Seine. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 186 p.
- Chabert d'Hières, G. & Le Provost, C.** (1978). Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. *Annales hydrographiques* 46, 5-35.
- Chiffolleau, J.-F.** (2001). La contamination métallique. Programme Scientifique Seine-Aval, 8. *IFREMER*, 41 p.
- Chiffolleau, J.-F., Gonzalez, J.-L., Miramand, P. & Thouvenin, B.** (1999). Le cadmium. Comportement d'un contaminant métallique en estuaire. Programme Scientifique Seine-Aval, 10. *IFREMER*, 31 p.
- Cugier, P.** (1999). Modélisation du devenir à moyen terme dans l'eau et le sédiment des éléments majeurs (N,P, Si) rejetés par la Seine en Baie de Seine. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 249 p.
- Cugier, P. & Le Hir, P.** (2000). Modélisation 3D des matières en suspension en baie de Seine orientale (Manche, France). *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris* 331 (série IIA), 287-294.
- Cugier, P. & Le Hir, P.** (2002). Development of 3D hydrodynamic model for coastal ecosystem modelling. Application to the plume of the Seine River (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 55 (5), 673-695.
- Delsinne, N.** (2001). Evolution morphosédimentaire du prisme tidal d'embouchure de la Seine. *Université de Lille I, Université de Caen*, 64 p.
- Dilligeard, E.** (1997). Télédétection des eaux de cas II - Caractérisation des sédiments marins. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université du Littoral, Côte d'Opale*, 184 p.
- Dubrulle, L.** (1982). Etude hydrosédimentaire de l'estuaire de l'Orne et de ses abords. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 212 p.
- Dubrulle, L. & Larsonneur, C.** (1984). Dynamique sédimentaire de l'estuaire de l'Orne. *XVIII<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique*. Société Hydrotechnique de France, Marseille, I.6.1-I.6.6.
- Dugué, O.** (1989). Géodynamique d'une bordure de massifs anciens: la bordure occidentale du bassin Anglo-Parisien au Callovo-Oxfordien. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 477 p.
- Dugué, O.** (1991). Comportement d'une bordure de massifs anciens et cortèges de minéraux argileux: l'exemple de la bordure occidentale du Bassin Anglo-Parisien au Callovo-Oxfordien. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 81, 323-346.
- Dupont, J.-P., Lafite, R., Huault, M.-F., Dupeuble, P.-A., Brylinski, J.-M., Guéguéniat, P., Lamboy, M. & Cabioch, L.** (1991). La dynamique des masses d'eaux et des remises en suspension en Manche orientale. *Oceanologica Acta* 11, 177-186.
- Dupont, J.-P., Lafite, R., Huault, M.-F., Hommeril, P. & Meyer, R.** (1994). Continental/marine ratio changes in suspended and settled matter across a macrotidal estuary (the Seine estuary, northwestern France). *Marine Geology* 120, 27-40.
- Dupont, J.-P., Guézennec, L., Lafite, R., Le Hir, P. & Lesueur, P.** (2001). Matériaux fins. Le cheminement des particules en suspension. Programme scientifique Seine-Aval, 4. *IFREMER*, 40 p.
- Dupuis, E., Laignel, B., Dupont, J.-P., Guézennec, L., Ferlin, P., Galard, Y. & Glémarec, I.** (2002). Apports fluviaux latéraux à l'estuaire de la Seine: synthèse des données disponibles et apports des mesures en continu. *Séminaire de travail Seine-Aval II, 2 & 3 octobre 2002*, 45.
- Ehrhold, A.** (1992). Etude des sédiments superficiels dans la Baie de Seine occidentale. *Mémoire de maîtrise, Université de Caen*, 41 p.
- Ehrhold, A.** (1993). Cartographie et dynamique des sédiments meubles de la Baie de Seine occidentale. *Mémoire de DEA*, 95 p.
- Ehrhold, A., Blanchart, M., Auffret, J.-P. & Garlan, T.** (1998). Conséquence de la prolifération de la crépidule (*Crepidula fornicata*) sur l'évolution sédimentaire de la baie du Mont-Saint-Michel (Manche, France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* IIA (327), 583-588.
- Ehrhold, A. & Auffret, J.-P.** (2002). Carte sédimentologique des abords du Havre et d'Antifer (embouchure de la Seine, de Ouistreham au Cap d'Antifer). 2002.
- Fily, G.** (1967). Etude sédimentologique et hydrologique de l'estuaire de l'Orne et du littoral adjacent (de Langrune à Cabourg). *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 128 p.

- Flageollet, J.C., Gigot, P., Helluin, E. & Maquaire, O.** (1987). Studies on landslides in Normandy (France), in view of their occurrence probability. *Fifth International Conference and Field Workshop on Landslides*, Australia & New Zealand 1st - 12th august 1987, 225-233.
- Garnaud, S.** (2002). Carte sédimentologique de la Pointe du Cou à la Pointe de Chassiron (Pertuis Breton et Charentais) 7404G. SHOM.
- Garnaud, S. & Lesueur, P.** (2001). Etude des sédiments fins dans la Baie de Seine - Rapport final année 2000-2001. *Contrat CNRS 51.01.09*, 46 p.
- Garnaud, S., Lesueur, P., Lesourd, S., Poupinet, N. & Brun-Cottan, J.-C.** (2001). Répartition et évolution actuelles des sédiments fins en Baie de Seine orientale: fluctuations dominées par les crues de la Seine *XXVII<sup>ème</sup> Colloque de l'Union des Océanographes de France: écosystèmes côtiers*, Lille, 65.
- Garnaud, S., Poizot, E., Méar, Y., Lesueur, P., Lesourd, S. & Brun-Cottan, J.-C.** (2001). Transport sédimentaire résiduel en domaine subtidal: application et amélioration de l'approche de Gao et Collins à la Baie de Seine orientale *8<sup>ème</sup> Congrès Français de Sédimentologie - Livre des résumés*. ASF, Paris, Orléans, 163-164.
- Garnaud, S., Lesueur, P., Méar, Y., Lafite, R., Poizot, E., Lesourd, S. & Brun-Cottan, J.-C.** (2002). Distribution et variabilité des sédiments fins en domaine macrotidal ouvert: l'exemple de la Baie de Seine orientale *19<sup>ème</sup> Réunion des Sciences de la Terre*, Nantes, 123.
- Garnaud, S., Lesueur, P., Lesourd, S., Poupinet, N. & Brun-Cottan, J.-C.** (2002). Caractérisation des variations lithologiques saisonnières des sédiments de la Baie de Seine orientale; impact des crues de la Seine (France). *Comptes Rendus Geoscience* 334, 323-330.
- Garnaud, S., Lesueur, P., Lesourd, S., Garlan, T., Clet, M. & Brun-Cottan, J.-C.** (soumis). Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner shelf (eastern Bay of the Seine, France). *Marine Geology*.
- Garreau, P. & Bailly du Bois, P.** (1997). Transportation of radionuclides in Celtic Sea a possible mechanism. *Radioprotection* 32 (C2), 381-385.
- Germain, P.** (1970). Etude sédimentologique et hydrologique de l'estuaire de la Dives et du littoral adjacent (Cabourg-Houlgate). *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 77 p.
- Germaneau, J.** (1968). Etude de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine. Origine, déplacement et dépôt des sables. *Travaux de Recherche et d'Etude Océanographique* VIII (1-2), 1-63.
- Germaneau, J.** (1969). Etude de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine. Origine, déplacement et dépôt des suspensions. *Travaux de Recherche et d'Etude Océanographique* IX (1-4), 1-100.
- Germaneau, J.** (1971). Sédiments actuels et sédiments fossiles dans la Seine maritime et dans la Seine fluviale. *Travaux de Recherche et d'Etude Océanographique* XI (1-4), 55-110.
- Germaneau, J.** (1974). Etude de la sédimentation dans la Seine et dans son estuaire. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Bordeaux*, 84 p.
- Guéguénat, P., Auffret, J.-P. & Baron, Y.** (1979). Evolution de la radioactivité artificielle gamma dans des sédiments littoraux de la Manche pendant les années 1976-1977-1978. *Oceanologica Acta* 2 (2), 165-180.
- Guézennec, L.** (1999). Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal: l'exemple de l'estuaire de la Seine (France). *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Rouen*, 240 p.
- Guézennec, L., Lafite, R., Dupont, J.-P., Meyer, R. & Boust, D.** (1999). Hydrodynamics of suspended particulate matter in the tidal freshwater zone of a macrotidal estuary (the Seine estuary, France). *Estuaries* 22 (3A), 717-727.
- Juhe, C.** (1999). Comportement hydrosédimentaire dans un secteur de vase littorale soumise à de forts courants de marée. *Rapport de Maîtrise, Université de Rouen*, 44 p.
- Laboratoire Central d'Hydraulique de France** (1984). Catalogue sédimentologique des côtes françaises - Côtes de la Mer du Nord et de la Manche à la frontière belge, 1606. *Eyrolles*, 408 p.
- Lafite, R.** (1990). Caractérisation et dynamique des particules en suspension dans un domaine marin macrotidal influencé par un estuaire: l'exemple de la Baie de Seine orientale (France). *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Rouen*, 294 p.
- Lafite, R.** (2000). Impact de la dynamique tidale sur les transferts des sédiments fins. *Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches*, Université de Caen, 80 p.
- Laignel, B.** (1991). Etude des sédiments superficiels aux abords du Havre. *Mémoire de maîtrise de l'Université de Caen*, 56 p.
- Larsonneur, C.** (1964). Petite drague pour fonds meubles et peu profonds. *Bulletin de la Société Linnéenne de Normandie* 5 (10), 94-96.

- Larsonneur, C.** (1969). Etude de la partie occidentale de la Baie de Seine. *Cahiers Océanographiques XXI* (5), 439-468.
- Larsonneur, C.** (1971). Manche centrale et Baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles, *Thèse d'Etat de l'Université de Caen*, 394 p.
- Larsonneur, C.** (1972). Le modèle sédimentaire de la Baie de Seine à la Manche centrale dans son cadre géographique et historique. *Mémoire du B.R.G.M.* 79, 241-255.
- Larsonneur, C.** (1974). Données scientifiques générales sur le littoral de la Baie de Seine, compléments sur l'hydrologie de la Baie de Seine. *Centre d'expression thématique et d'expérimentation sur l'environnement du site marin de la Baie de Seine*, 27-38 p.
- Larsonneur, C.** (1975). Sur l'hydrologie de la Baie de Seine. *CETEEM (Centre d'Expression Thématique et d'Expérimentation sur l'Environnement du site Marine de la Baie de Seine)*, Ouistreham, 27-38 p.
- Larsonneur, C.** (1977). De la Baie de Seine à l'estuaire de la Seine, histoire du Quaternaire marin. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre LXIV* (4), 9-19.
- Larsonneur, C.** (1985). Dynamique des suspensions et des dépôts en Baie de Seine : une synthèse des résultats. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 93-108.
- Larsonneur, C. & Hommeril, P.** (1967). Sédiments et sédimentation dans la partie orientale de la Baie de Seine. *Extrait de la revue des sociétés savantes de Hautes-Normandie* 47, 45-75.
- Larsonneur, C. & Avoine, J.** (1981). Détermination des flux de matières en suspension en Baie de Seine. Contrat IFREMER 81/6559. *Contrat IFREMER 81/6559, Laboratoire de géologie marine, Université de Caen*, 45 p.
- Larsonneur, C., Bouysse, P. & Auffret, J.-P.** (1982). The superficial sediments of the English Channel and its Western Approaches. *Sedimentology* 29, 851-864.
- Laudridou, J.P., Auffret, J.P., Baltzer, A., Clet, M., Lecolle, F., Lefebvre, D., Lericolais, G., Roblin-Jouve, A., Balescu, S., Carpentier, G., Occhietti, S. & Rousseau, D.D.** (1999). Le fleuve Seine, le fleuve Manche. *Bulletin de la Société Géologique de France* 170 (4), 545-558.
- Lavoine, E.** (1885). La Seine maritime et son estuaire. Encyclopédie des travaux publics. *Baudry et C<sup>te</sup> & Leroux, E.* (Editeurs), 311 p.
- Le Floch, J.-F.** (1961). Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine et en Seine-Maritime, *Thèse d'Etat de la Faculté des sciences de l'Université de Paris*, 494 p.
- Le Hir, P.** (1980). Calcul par modélisation numérique de la structure verticale des courants et application à la Baie de Seine. *Thèse d'ingénieur, Université de Brest*, 122 p.
- Le Hir, P. & L'Yavanc, J.** (1985). Observations de courant en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 25-33.
- Le Hir, P., Salomon, J.C., Le Provost, C., Chabert d'Hiere, G. & Mauvais, J.L.** (1985). Approche de la circulation résiduelle en Baie de Seine. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 63-71.
- Le Hir, P. & Silva Jacinto, R.** (2001). Courants, vagues et marées: les mouvements de l'eau. Programme Scientifique Seine-Aval, 2. *IFREMER*, 31 p.
- Le Hir, P., Ficht, A., Silva Jacinto, R., Lesueur, P., Dupont, J.-P., Lafite, R., Brenon, I., Thouvenin, B. & Cugier, P.** (2001). Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine estuary (France). *Estuaries* 24 (6B), 950-963.
- Le Provost, C., Fornerino, M. & Villaret, C.** (1986). Sur l'hydrodynamique de la Baie de Seine. Résultats d'observations et de modélisations. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 43-48.
- Lecouturier, M., Grochowski, N., Bishop, C., Wilkin, M., Avoine, J., Levoy, F., Velegrakis, A.F. & Collins, M.B.** (1997). Sub-task S1 : measurement of processes at the sediment/water interface, Final report of FLUXMANCHE, hydrodynamics and Biogeochemical Processes and Fluxes in the channel, 101-120.
- Lefebvre, D.** (1977). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre LXIV* (4), 67-72.
- Lefebvre, D., Huault, M.-F., Guyader, J., Giresse, P., Hommeril, P. & Larsonneur, C.** (1974). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine: synthèse sédimentologique, stratigraphique et paléogéographique. *Bulletin d'Information Géologique du Bassin de Paris* 39, 27-36.
- Lenner, G.** (1885). L'estuaire de la Seine. Mémoires, notes et documents pour servir à l'étude de l'estuaire de la Seine, 2 volumes et 1 atlas. *Hustin imprimerie, Le Havre*.
- Lesourd, S.** (2000). Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal: zoom temporel du siècle à l'heure; application à l'estuaire de la Seine. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 280 p.

- Lesourd, S., Lesueur, P. & Brun-Cottan, J.-C.** (1997). Intérêt des études rhéologiques de sédiments vaseux littoraux. Le cas de l'embouchure de la Seine. *6ème Congrès Français de Sédimentologie, Poster et Résumés, Paris*. ASF, 169-170.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Auffret, J.P., Poupinet, N. & Laignel, B.** (2001). Morphosedimentary evolution of a macrotidal estuary subjected to human impact; the example of the Seine (France). *Estuaries* 24 (6B), 940-949.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Garnaud, S. & Poupinet, N.** (2003). Seasonal variations in the characteristics of superficial sediments in a macrotidal estuary (the Seine inlet, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 56, 1-14.
- Lesueur** (2001). Livret I: Dynamique et archivage des flux continentaux de particules fines dans le domaine côtier: exemples de modèles actuels. *Université de Caen, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches*, 149 p.
- Lesueur, P.** (1992). Les vasières de la plate-forme ouest-girondine (France): modèle faciologique et archive sédimentaire des flux côtiers. *Thèse de 3ème cycle, Université de Bordeaux*, 197 p.
- Lesueur, P., Tastet, J.-P. & Marambat, L.** (1996). Shelf mud fields formation within historical times: examples from offshore the Gironde estuary, France. *Continental Shelf Research* 16 (4), 1849-1870.
- Lesueur, P., Lesourd, S., Auffret, J.P., Avoine, J., Brun-Cottan, J.-C. & Levoy, F.** (1997). Etat des connaissances sur la distribution et l'évolution des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine. *Rapport programme Seine-Aval 1996/FIN-1, Thème Hydrodynamique et transport sédimentaire*, 82-115.
- Lesueur, P. & Lesourd, S.** (1999). Sables, chenaux, vasières. Dynamique des sédiments et évolution morphologique. Programme scientifique Seine-Aval, 3. *IFREMER*, 39 p.
- Lesueur, P., Jouanneau, J.-M., Boust, D., Tastet, J.-P. & Weber, O.** (2001). Sedimentation rates and fluxes in the continental shelf mud fields in the Bay of Biscay (France). *Continental Shelf Research* 21, 1383-1401.
- Lesueur, P., Tastet, J.-P. & Weber, O.** (2002). Origin and morphosedimentary evolution of fine-grained modern continental shelf deposits: the Gironde mid fields (Bay of Biscay, France). *Sedimentology* 49, 1-22.
- Lesueur, P., Garnaud, S., Lesourd, S., Brun-Cottan, J.-C., Poupinet, N. & Tessier, B.** (2002). Fonctionnement sédimentaire de vasières intertidales et subtidales de la Seine. *Rapport annuel programme Seine-Aval II, Thématique II: Zones connexes, Atelier II.3: Fonctionnement des vasières*, Université de Caen, 32 p.
- Lesueur, P., Garnaud, S., Méar, Y., Lafite, R., Poizot, E., Brun-Cottan, J.-C. & Dupont, J.-P.** (2002). Distribution et variabilité des sédiments fins en Baie de Seine orientale. *Bilan du Chantier Baie de Seine, Réunion du Conseil Scientifique*, Dinard.
- Lesueur, P., Lesourd, S., Lefebvre, D., Garnaud, S. & Brun-Cottan, J.-C.** (2003). Holocene and modern sedimentation in the Seine estuary (France): a synthesis. *Journal of Quaternary Research*, sous presse.
- Meybeck, M., Mouchel, J.M., Idlafkich, Z., Andreassian, V. & Thibert, S.** (1998). Transferts d'eau, de matière dissoute et particulaire dans le réseau fluvial. In: Meybeck, M. (Editor). *La Seine et son bassin. Fonctionnement écologique d'un système anthropisé*. Elsevier, 345-389.
- Porcher, M.** (1977). Lithostratigraphie des alluvions fluviales holocènes de la basse vallée de la Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 181-201.
- SAUM** (1980). Estuaire de la Seine: études hydrosédimentaire (J. Avoine, 95 p.), études des suspensions (J.-P. Dupont & F. David, 56 p.), programme géochimie (D. Boust, 52 p), analyses par activation neutronique (P. Guégueniat, 13 p.). *dossier n°4, eau et sédiments*, 216 p.
- Servais, P., Castignolles, N., Petit, F., George, I., Buffet-Janvresse, C. & Ficht, A.** (1999). Contaminations bactérienne et virale. Programme Scientifique Seine-Aval, 6. *IFREMER*, 26 p.
- SHOM** (1968). Courants de marée dans la Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique. *Imprimerie Nationale, Paris*, 287 p.
- SHOM** (1996). Courants de marée: Baie de Seine de Cherbourg à Fécamp. Courants de marée en France. *EPSHOM, Brest*, 54 p.
- SHOM** (1968). Les courants de marée dans la mer de la Manche et sur les côtes Françaises de l'Atlantique, 550. *Paris*, 176 p.
- Spineanu, A.** (1998). Mobilité des sédiments fins en Baie de Seine (Manche). *Mémoire de DEA, Université de Lille/Orsay*, 56 p.
- Sudry, M.L.** (1911). Les sédiments marins des côtes du Calvados. *Comptes rendus du congrès des sociétés savantes de Paris et des départements*. Imprimerie Nationale, Caen, 25-32.
- Thiébaud, E.** (1996). Distribution of *Pectinaria koreni* larvae (annelida: polychaeta) in relation to the Seine river plume front (eastern English Channel). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73, 383-397.

- Thiébaud, E., Cabioch, L., Dauvin, J.-C., Retière, C. & Gentil, F.** (1997). Spatio-temporal persistence of the *Alba-Pectonaria Koreni* muddy-fine sand community of the eastern bay of Seine. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 77, 1165-1185.
- Thoulet** (1908-1909). Etude des fonds marins de la Baie de Seine. *Annales hydrographiques*, 1-28.
- Vaslet, D., Larsonneur, C. & Auffret, J.-P.** (1978). Carte des sédiments superficiels de la Manche au 1:500 000° et notice explicative. B.R.G.M, Orléans, 17 p.
- Videau, C., Ryckaert, M. & L'Helguen, S.** (1998). Phytoplancton en Baie de Seine. Influence du panache fluvial sur la production primaire. *Oceanologica Acta* 21 (6), 907-921.
- Volmat, M.** (1929). Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. 22<sup>ème</sup> cahier de la recherche hydrographique sur le régime des côtes, 97-135.
- Vigarié, A.** (1964). Etude critique de la documentation sur l'évolution morphologique de l'estuaire de la Seine, *Thèse d'Etat de l'Université de Paris*, Paris, 380 p.

### Dépôts holocènes en Normandie

- Auffret, J.-P. & Larsonneur, C.** (1977). Paléovallées et bancs sableux entre l'estuaire de la Seine et le Nord-Cotentin. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 21-33.
- Auffret J.-P. & D'Ouzouville, L.** (1986). Cartographie du prisme sédimentaire Holocène en Baie de Seine Orientale par sismique réflexion à haute résolution. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 109-116.
- Clet-Pellerin, M., Dupeuble, P.-A., Helliun, M., Lefebvre, D., Pellerin, J., Brebion, P., Lauriat-Rage, A., Laudridou, J.-P. & Rioult, M.** (1987). Les formations marines et continentales du Pléistocène récent dans la région d'Asnelles-Saint-Côme-de-Fresné (Calvados). *Bulletin du Centre de Géomorphologie du CNRS* 32, 71-98.
- Bassompierre, P.** (1944). La tourbe dans le Calvados et principalement au nord de Caen. *Diplôme d'études supérieures de géologie*, Caen, 41 p.
- Cahiers De La Faculté Des Lettres De L'université De Caen** (1944-1945). L'évolution verticale: les anciens niveaux marins, chapitre 3: La transgression flandrienne proprement dite, Le littoral de la plaine de Caen: étude de géographie physique, 50-63.
- Clet-Pellerin, M., Huault, M.-F., Larsonneur, C. & Pellerin, J.** (1976). La basse vallée de l'Orne: le remblaiement périglaciaire et postglaciaire, l'évolution paléogéographique et l'histoire de la végétation. *Bulletin de la Société Limnéenne de Normandie* 105, 23-44.
- Cyprien, A.-L. & Visset, L.** (2002). Chronologie de l'interaction de l'homme et du milieu dans l'espace central et aval de la Loire (Ouest de la France). *GEMINA*, Nantes, 183 p.
- Elhai, H. & Larsonneur, C.** (1969). Dépôts tardiglaciaires et post glaciaires sur la côte du Calvados. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire* 2, 93-103.
- Guyader, J.** (1977). Le Quaternaire de la zone portuaire havraise. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 39-63.
- Huault, M.-F.** (1977). L'estuaire de la Seine au Quaternaire, chronologie absolue au radiocarbone. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 203.
- Huault, M.-F., Lefebvre, D., Hommeril, P., Guyader, J., Giresse, P. & Larsonneur, C.** (1974). L'évolution de la basse-vallée de la Seine depuis la dernière glaciation. *Mémoire de l'Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine (IGBA)* 7, 313-319.
- Hue, E.** (1938). Sur une progression marine au ruisseau de Luc (Calvados). *Bulletin de la Société des Antiquaires de Normandie* XLV, 384-385.
- Larsonneur, C.** (1977). De la Baie de Seine à l'estuaire de la Seine, histoire du Quaternaire marin. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 9-19.
- Lautridou, J.-P., Pellerin, J. & Clet-Pellerin, M.** (1987). Les formations marines et continentales d'Asnelles-Saint-Côme-de-Fresné. *Association Française pour l'étude du Quaternaire, excursion du 28 au 31 mai 1987 "La normandie"*, 161-170.
- Lefebvre, D.** (1977). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 67-72.
- Lefebvre, D.** (1977). Les alluvions holocènes de basse-Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 73-74.

- Lefebvre, D., Huault, M.-F., Guyader, J., Giresse, P., Hommeril, P. & Larsonneur, C.** (1974). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine: synthèse sédimentologique, stratigraphique et paléogéographique. *Bulletin d'Information Géologique du Bassin de Paris* 39, 27-36.
- Leroyer, C.** (1997). Homme, climat, végétation au Tardi-et Postglaciaire dans le Bassin Parisien: apports de l'étude palynologique des fonds de vallée. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne*, 574 p.
- Morzadec-Kerfourn, M.T.** (1995). Coastal changes in the armorican massif (France) during the Holocene. *Journal of Coastal Research* 17, 197-203.
- Morzadec-Kerfourn, M.-T. & Delibrias, G.** (1972). Analyses polliniques et datations radiocarbone des sédiments quaternaires prélevés en Manche centrale et orientale. *Mémoire du BRGM* 79, 160-165.
- Pellerin, J.** (1977). Les nappes alluviales de l'Orne, leurs altérations et leurs relations avec les dépôts marins sur la côte du Calvados. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* XIV (4), 75-80.
- Porcher, M.** (1977). Lithostratigraphie des alluvions fluviatiles holocènes de la basse vallée de la Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* LXIV (4), 181-201.
- Taborin, J.** (1999). Différents type de tourbières. *Géochronique* 71, 8.
- Ters, M., Azema, C., Brebion, P., Churcher, C.S., Delibrias, G., Deneffe, M., Guyader, J., Lauriat-Rage, A., Mathieu, R., Michel, J.-P., Osborne, P.J., Rouvillois, A. & Shotton, F.W.** (1971). Sur le remblaiement holocène dans l'estuaire de la Seine au Havre (Seine Maritime), France. *Quaternaria* XIV, 151-174.

### **Dépôts des plateaux continentaux mondiaux et processus**

- Allen, J.R.L.** (1993). An introduction to estuarine lithosomes and their controls. *Sedimentology review* 1, 123-138.
- Allen G.P., Salomon, J.C., Bassoullet, P., Du Penhoat, Y. & De Grandpré, C.** (1980). Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sedimentary Geology* 26, 69-90.
- Alexander, C.R., Elfers, T. & Simoneau, A.** (2000) Sedimentary processes on an active, accretionary continental slope. <http://www.skio.peachnet.edu/faculty/alexander/StrataformPoster.html>
- Allison, M.A., Nittrouer, C.A. & Faria, L.E.C.** (1995). Rates and mechanisms of shoreface progradation and retreat downdrift of the Amazon river mouth. *Marine Geology* 125, 373-392.
- Allison, M.A., Nittrouer, C.A., Faria, L.E.C., Silveira, O.M. & Mendes, A.C.** (1996). Sources and sinks of sediment to the Amazon margin: the Amapa coast. *Geo-Marine Letters* 16, 36-40.
- Allison, M.A. & Nittrouer, C.A.** (1998). Identifying accretionary mud shorefaces in the geologic record: insights from the modern Amazon dispersal system. In: Schieber, J., Zimmerle, W. & Sethi, P.S. (Editors). *Shales and Mudstones*. Schweizerbart Verlag, Stuttgart, 147-161.
- Allison, M.A., Kineke, G.C., Gordon, E.S. & Goni, M.A.** (2000). Development and reworking of a seasonal flood deposit on the inner continental shelf off the Atchafalaya River. *Continental Shelf Research* 20, 2267-2294.
- Aloisi, J.-C., Auffret, G.A., Auffret, J.-P., Barusseau, J.P., Hommeril, P., Larsonneur, C. & Monaco, A.** (1977). Essai de modélisation de la sédimentation actuelle sur les plateaux continentaux français. *Bulletin de la Société Géologique de France* 7 (2), 183-195.
- Antoneli, C.** (2002). Flux sédimentaire et morphogenèse dans le chenal du Rhône aval. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université d'Aix-Marseille III*, 280 p.
- Barusseau, J.P. & Long, B.** (1976). Ambiguïté de la notion de sables actuels et reliques: exemple de la côte nord-ouest de l'île de Ré. *Annales hydrographiques* 4 (1), 75-81.
- Bastos, A.C., Kenyon, N.H. & Collins, M.** (2002). Sedimentary processes, bedforms and facies, associated with a coastal headland: Portland Bill, Southern UK. *Marine Geology* 187 (3-4), 235-258.
- Boldrin, A., Bortoluzzi, G., Frascari, F., Guerzoni, S. & Rabitti, S.** (1988). Recent deposits and suspended sediments off the Po delta Pila (Po River, main mouth Italy). *Marine Geology* 79, 159-170.
- Borgeld, J.C., Clarke, J.E.H., Goff, J.A., Mayer, L.A. & Curtis, J.A.** (1999). Acoustic backscatter of the 1995 flood deposit on the Eel river. *Marine Geology* 154, 197-210.
- Brown, W.M.I. & Ritter, J.R.** (1971). Sediment transport and turbidity in the Eel River basin, California. *U.S. Geological Survey Water-Supplement papers* 1986, 70 p.
- Bouchet, J.-M.** (1987). Distribution estivale des pélites dans les sédiments superficiels de la plateforme sud-gascogne. *Colloque International d'Océanologie*. CIESM, Perpignan, 21-22.
- Bourcart, J. & François-Boeuf, C.** (1942). La vase. *Sédiments et sédimentation*, Herman & C<sup>ie</sup>, Paris, 67 p.
- Castaing, P.** (1981). Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes. Cas de la Gironde. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Bordeaux I*, 530 p.

- Coleman, J.M., Roberts, H.H. & Stone, G.W.** (1998). Mississippi river delta: an overview. *Journal of Coastal Research* 14 (3), 698-716.
- Curran, K.J., Hill, P.S. & Milligan, T.G.** (2002). Fine-grained suspended sediment dynamics in the Eel River flood plume. *Continental Shelf Research* 22 (17), 2537-2550.
- Curray, J.R.** (1973). Equilibrium, relict, palimpsest and pseudo equilibrium shelf sediments. *Symposium international sur les relations entre estuaires et plateaux continentaux*. Livre des résumés, Bordeaux, 28.
- Cutshall, N.H., Larson, I.L., Olsen, C.R., Nittrouer, C.A. & DeMaster, D.J.** (1986). Columbia River sediment in Quinault canyon, evidence from artificial radionuclides. *Marine Geology* 71, 125-136.
- David, E.D.** (1999). Temporal and spatial variability of the sediment grain-size distribution on the Eel shelf: the flood layer of 1995. *Marine Geology*, 154, 169-182.
- Davies, A.M. & Xing, J.** (2002). Processes influencing suspended sediment movement on the Malin-Hebrides shelf. *Continental Shelf Research* 22, 2081-2113.
- DeMaster, J.D., McKee, B.A., Nittrouer, C.A., Jiangchu, Q. & Guodong, C.** (1985). Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea. *Continental Shelf Research* 4 (1/2), 143-158.
- Dias, J.R.A. & Nittrouer, C.A.** (1984). Continental shelf sediments of northern Portugal. *Continental Shelf Research* 3 (2), 147-165.
- Drake, D.E.** (1976). Suspended sediment transport and mud deposition on continental shelves. In: Stanley, D.J. & Swift, D.J.P. (Editors), *Marine sediment transport and environmental management*. John Wiley & Sons, New York, 127-158.
- Drake, D.E.** (1999). Temporal and spatial variability of the sediment grain-size distribution on the Eel shelf: the flood layer of 1995. *Marine Geology*, 154, 169-182.
- Drake, D.E. & Cacchione, R.W.** (1985). Seasonal variation in sediment transport on the Russian River shelf, California. *Continental Shelf Research* 4, 495-514.
- Eisma, D.** (1968). Composition, origin and distribution of Dutch coast sands between Hoeck van holland and the Island of Vlieland (Netherlands). *Journal of Sea Research* 4, 123-267.
- Eisma, D.** (1981). Supply and deposition of suspended matter in the North Sea. *Special Publication of the International Association of Sedimentologists* 5, 415-428.
- Eisma, D.** (1992). Suspended matter in the aquatic environment. *Springer-Verlag*, Berlin, 315 p.
- Eisma, D. & Kalf, J.** (1987). Dispersal, concentration and deposition of suspended matter in the North Sea. *Journal of the Geological Society, London* 144, 1987.
- Emery, K.O.** (1968). Relict sediments on continental shelves of the world. *Bulletin American Association of Petroleum Geologists* 52, 445-464.
- Emery, K.O.** (1969). The continental shelves. *Scientific American* (The ocean), 106-122.
- Emery, K.O. & Uchupi, E.** (1984). The geology of the Atlantic ocean. *Springer-Verlag*, Berlin, 1050 p.
- Gadd, P.E., Lavelle, J.W. & Swift, D.J.P.** (1978). Estimated of sand transport on the New York shelf using near-bottom current meter observations. *Journal of Sedimentary Petrology* 48, 239-252.
- Galloway, W.E. & Hobday, D.K.** (1983). Terrigenous clastic depositional systems. *Springer-Verlag*, Berlin, 423 p.
- Geyer, W.R., Beardsley, R.C., Candela, J., Castro, B.M., Legeckis, R.V., Lentz, S.J., Limeburner, R., Miranda, L.B. & Trowbridge, J.H.** (1991). The physical oceanography of the Amazon outflow. *Oceanography* 4, 8-14.
- Geyer, W.R., Hill, P., Milligan, T. & Traykovski, P.** (2000). The structure of the Eel River plume during floods. *Continental Shelf Research* 20, 2067-2093.
- Geyer, W.R., Hill, P.S. & Kineke, G.C.** (2003). The transport and dispersal of sediment by buoyant coastal flows. *Continental Shelf Research*, sous presse.
- Goff, J.A., Wheatcroft, R.A.b., Lee, H., Drake, D.E., Swift Donald, J.P. & Fan, S.** (2002). Spatial variability of shelf sediments in the STRATAFORM natural laboratory, Northern California. *Continental Shelf Research* 22, 1199-1223.
- Gorsline, D.S.** (1984). A review of fine-grained sediment origins, characteristics, transport and deposition. In: Stow, D.A.V. & Piper, D.J.W. (Editors). *Fine-grained sediments: deepwater processes and facies*. Special publication of the Geological Society of London, 17-29.
- Gouleau, D.** (1968). Etude hydrologique et sédimentologique de la baie de Bourgneuf. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 187 p.
- Gouleau, D.** (1971). Le régime hydrodynamique de la Baie de Bourgneuf et ses conséquence sur la sédimentation. *Cahiers Océanographiques* 7, 629-647.

- Gouleau, D. (1971). Le remplissage sédimentaire de la baie de Bourgneuf. *Bulletin du BRGM IV* (2), 23-32.
- Harden, S.L., DeMaster, D.J. & Nittrouer, C.A. (1992). Developing geochronologies for high-latitude continental shelf deposits: a radiochemical approach. *Marine Geology* 103, 69-98.
- Harris, P.T., Baker, E.K., Cole, A.R. & Short, S.A. (1993). A preliminary study of sedimentation in the tidally dominated Fly River delta, Gulf of Papua. *Continental Shelf Research* 13, 441-472.
- Héquette, A. & Hill, P.R. (1993). Storm-generated currents and offshore sediment transport on a sandy shoreface, Tibjak Beach, Canadian Beaufort Sea. *Marine Geology* 113, 283-304.
- Hill, P.S., Milligan, T.G. & Geyer, W.R. (2000). Controls on effective settling velocity of suspended sediment in the Eel River flood plume. *Continental Shelf Research* 20 (16), 2095-2111.
- Karlin, R. (1980). Sediment sources and clay mineral distributions off the Oregon coast. *Journal of Sedimentary Petrology* 50, 543-560.
- Kineke, G.C., Sternberg, R.W., Cacchione, D.A., Kranck, K. & Drake, D.E. (1991). Distribution and characteristics of suspended sediment on the Amazon shelf. *Oceanography* 4 (21), 21-26.
- Kuehl, S.A., DeMaster, D.J. & Nittrouer, C.A. (1986). Nature of sediment accumulation on the Amazon continental shelf. *Continental Shelf Research* 6 (1/2), 209-225.
- Kuehl, S.A., Nittrouer, C.A. & DeMaster, D.J. (1986). Distribution of sedimentary structures in the Amazon subaqueous delta. *Continental Shelf Research* 6 (1/2), 311-336.
- Kuehl, S.A., Nittrouer, C.A. & DeMaster, D.J. (1982). Modern sediment accumulation and strata formation on the Amazon continental shelf. *Marine Geology* 49, 279-300.
- Kuehl, S.A., Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J. & Curtin, T.B. (1984-1985). An overview of sedimentation on the Amazon continental shelf. *Geo-Marine Letters* 4, 207-210.
- Kuehl, S.A., Nittrouer, C.A., Allison, M.A., Faria, L.E.C., Dukat, D.A., Jaeger, J.M., Pacioni, T.D., Figueiredo, A.G. & Underkoffler, E.C. (1996). Sediment deposition, accumulation, and seabed dynamics in an energetic, fine-grained coastal environment. *Continental Shelf Research* 16 (5/6), 787-815.
- Leithold, E.L. & Hope, R.S. (1999). Deposition and modification of a flood layer on the northern California shelf: lessons from and about the fate of terrestrial particulate organic carbon. *Marine Geology* 154, 183-195.
- Lesueur, P. (1992). Les vasières de la plate-forme ouest-girondine (France): modèle faciologique et archive sédimentaire des flux côtiers. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Bordeaux*, 197 p.
- Li, M.Z., Amos, C.L. & Heffer, D.E. (1997). Boundary layer dynamics and sediment transport under storm and non-storm conditions on the Scotian Shelf. *Marine Geology* 141, 157-181.
- Li, M.Z. & Amos, C.L. (1999). Field observations of bedforms and sediment transport thresholds of fine sand under combined waves and currents. *Marine Geology* 158, 147-160.
- Liu, J.T., Liu, K.-j. & Huang, J.C. (2002). The effect of a submarine canyon on the river sediment dispersal and inner shelf sediment movements in southern Taiwan. *Marine Geology* 181, 357-386.
- Malamud, B.D. & Turcotte, D.L. (2003). Shelf record of climatic changes in flood magnitude and frequency, north-coastal California: comment. *Geology*, 31 (3), 288-288.
- McKee, B.A., Nittrouer, C.A. & J., D.D. (1983). Concepts of sediment deposition and accumulation applied to the continental shelf near the mouth of the Yangtze River. *Geology* 11, 631-633.
- McCave, I.N. (1972). Transport and escape of fine-grained sediments from shelf areas. In: Swift, D.J.P., Duane, D.B. & Pilkey, O.H. (Editors). *Shelf Sediment Transport: Process and Patterns*. Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Dowden, 225-248.
- McCave, I.N. (1984). Erosion, transport and deposition of fine-grained marine sediments. In: Stow, D.A.V. & Piper, D.J.W. (Editors). *Fine-grained sediments: Deep-Water Process and facies*. Blackwell Scientific publications, 35-69.
- Meade, R.H. (1972). Sources and sinks of suspended matter on continental shelves. In: Swift, D.J.P., Duane, D.B. & Pilkey, O.H. (Editors). *Shelf Sediment Transport: Process and Patterns*. Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Dowden, 249-262.
- Migniot, C. (1968). Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. *La Houille Blanche* 7, 591-620.
- Milliman, J.D. (1990). Les matières solides dans les mers littorales: flux et devenir. *Nature & Ressources* 26 (4), 12-22.
- Milliman, J.D. & Meade, R.H. (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology* 91, 1-21.
- Milliman, J.D., Qin, Y., Ren, M.E. & Saito, Y. (1987). Man's influence on the erosion and transport of sediment by Asian rivers, The Yellow River (Huanghe) example. *Journal of Geology* 95, 751-762.

- Milliman, J.D. & Syvitski, J.P.M. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *Journal of Geology* 100, 525-544.
- Mulder, T. & Syvitski, J.P.M. (1995). Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans. *Journal of Geology* 103, 285-299.
- Mullenbach, B.L. & Nittrouer, C.A. (2000). Rapid deposition of fluvial sediment in the Eel Canyon, northern California. *Continental Shelf Research* 20, 2191-2212.
- Nittrouer, C.A. (1993). Controlling the ingredients that flow to the sea, oceanic processes near river mouths. *Oceanus* 36, 12-18.
- Nittrouer, C.A. (1999). STRATAFORM: overview of its design and synthesis of its results. *Marine Geology*, 154, 3-12.
- Nittrouer, C.A. (1999). The formation of continental-margin strata - Preface. *Marine Geology* 154, 1-1.
- Nittrouer, C.A., Sternberg, R.W., Carpenter, R. & Bennett, J.T. (1979). The use of  $^{210}\text{Pb}$  geochronology as a sedimentological tool: Application to the Washington continental shelf. *Marine Geology* 31, 297-316.
- Nittrouer, C.A. & Sternberg, R.W. (1981). The formation of sedimentary strata in an allochthonous shelf environment: the Washington continental shelf. *Marine Geology* 42, 201-232.
- Nittrouer, C.A., Sharara, M.T. & DeMaster, D.J. (1983). Variations of sediment texture on the Amazon continental shelf. *Journal of Sedimentary Petrology* 53 (1), 179-191.
- Nittrouer, C.A., McKee, B.A. & DeMaster, D.J. (1984). Fine-scale stratigraphy in proximal and distal deposits of sediment dispersal systems in the East China Sea. *Marine Geology* 61, 13-24.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., Kuehl, S.A., McKee, B.A. & Thorbjarnarson, K.W. (1984-1985). Some questions and answers about the accumulation of fine-grained sediment in continental margin environments. *Geo-Marine Letters* 4, 211-213.
- Nittrouer, C.A. & DeMaster, D.J. (1986). Sedimentary processes on the Amazon continental shelf: past, present, and future research. *Continental Shelf Research* 6 (1/2), 5-30.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., Kuehl, S.A. & Kowsmann, R.O. (1986). The deltaic nature of Amazon shelf sedimentation. *Geological Society of American Bulletin* 97, 444-458.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., Kuehl, S.A. & McKee, B.A. (1986). Association of sand with mud deposits accumulating on continental shelves. In: Knight, R.J. & McLean, J.R. (Editors). *Shelf Sands and Sandstones*. Canadian Society of Petroleum Geologists, 17-25.
- Nittrouer, C.A., DeMaster, D.J., Figueiredo, A.G. & Rine, J.M. (1991). AmasSeds: an interdisciplinary investigation of a complex coastal environment. *Oceanography* 4, 3-7.
- Nittrouer, C.A., Kuehl, S.A., Rine, J.M., Figueiredo, A.G., Faria, L.E.C., Dias, G.T.M., Silva, M.A.M., Allison, M.A., Pacioni, T.D., Segall, M.P., Underkoffler, E.C., Borges, H.V. & Silveira, O.F. (1991). Sedimentology and stratigraphy of the Amazon continental shelf. *Oceanography* 4, 33-38.
- Nittrouer, C.A. & Wright, L.D. (1994). Transport of particles across continental shelves. *Reviews of Geophysics*, 85-113.
- Nittrouer, C.A. & DeMaster, D.J. (1996). The Amazon shelf setting - tropical, energetic, and influenced by a large river. *Continental Shelf Research* 16 (5-6), 553-573.
- Nittrouer, C.A. & Kravitz, J.H. (1996). STRATAFORM: A program to study the creation and interpretation of sedimentary strata on continental margins. *Oceanography* 9 (3), 146-152.
- Nittrouer, C.A., Kuehl, S.A., Figueiredo, A.G., Allison, M.A., Sommerfield, C.K., Rine, J.M., Faria, L.E.C. & Silveira, O.M. (1996). The geological record preserved by Amazon shelf sedimentation. *Continental Shelf Research* 16 (5/6), 817-841.
- Nittrouer, C.A. & Kravitz, J.H. (1998). STRATAFORM Programm. <http://strata.ocean.washington.edu/>
- Ogston, A.S. & Sternberg, R.W. (1999). Sediment-transport events on the northern California continental shelf. *Marine Geology*, 154, 69-82.
- Ogston, A.S., Cacchione, D.A., Sternberg, R.W. & Kineke, G.C. (2000). Observations of storm and river flood-driven sediment transport on the northern California continental shelf. *Continental Shelf Research*, 20, 2141-2162.
- Oliveira, A., Vitorino, J., Rodrigues, A., Jouanneau, J.-M., Dias, J.A. & Weber, O. (2002). Nepheloid layer dynamics in the northern Portuguese shelf. *Progress in Oceanography* 52 (2-4), 195-213.
- Palanques, A. & Drake, D.E. (1990). Distribution and dispersal of suspended particulate matter on the Elbro continental shelf, northwestern Mediterranean Sea. *Marine Geology* 95, 193-206.
- Park, Y.A., Kim, S.-C. & Choi, J.-H. (1986). The distribution and transportation of fine-grained sediments on the inner continental shelf off the Keum River estuary, Korea. *Continental Shelf Research* 5, 499-519.

- Park, Y.A. & Khim, B.K. (1992). Origin and dispersal of recent clay minerals in the Yellow Sea. *Marine Geology* 104, 205-213.
- Parsons, J.D., Bush, J.W.M. & Syvitski, J.P. (2001). Hyperpycnal plume formation from riverine outflows with small sediment concentration. *Sedimentology* 48, 465-478.
- Pinot, J.-P. (1974). Le précontinent breton entre Penmarc'h, Belle-Ile et l'escarpement continental. Etude géomorphologique. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Brest*, 256 p.
- Pontee, N.L., Tastet, J.-P. & Massé, L. (1998). Morpho-sedimentary evidence of Holocene coastal changes near the mouth of the Gironde and on the Medoc peninsula, SW France. *Oceanologica Acta*, 21 (2), 243-261.
- Postma, H. (1967). Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. *American Association of Advanced Science* 83, 158-179.
- Pouliquen, M. (1975). Etude minéralogique et géochimique des sédiments du littoral vendéo-charentais et de la vasière ouest-Gironde (France): application à la connaissance de l'origine et de la dynamique des vases dans la baie de Marennes-Oléron. *Thèse d'Etat de l'Université de Bordeaux I*, 159 p.
- Puig, P., Ogston, A.S., Mullenbach, B.L., Nittrouer, C.A. & Sternberg, R.W. (2003). Shelf-to-canyon sediment-transport processes on the Eel continental margin (northern California). *Marine Geology* 193, 129-149.
- Pujos, M. & Javelaud, O. (1991). Depositional facies of a mud shelf between the Sinu river and the Darien Gulf (Caribbean coast of Colombia); Environmental factors that control its sedimentation and origin of deposits. *Continental Shelf Research* 11, 601-623.
- Rhoads, D.C. (1974). Organism-sediment relations on the muddy sea floor. *Oceanography and Marine Biology* 12, 263-300.
- Ruch, P., Mirmand, M., Jouanneau, J.-M. & Latouche, C. (1993). Sediment budget and transfer suspended sediment from Gironde estuary to Cap Ferret Canyon. *Marine Geology* 111, 109-119.
- Ruessink, B.G., Houwman, K.T. & Hoekstra, P. (1998). The systematic contribution of transporting mechanisms to the cross-shore sediment transporting water depths of 3 to 9 m. *Marine Geology* 152, 295-324.
- Russel, P.E. (1993). Mechanisms for beach erosion during storms. *Continental Shelf Research* 13, 1243-1265.
- Sandford, L.P. & Halka, J.P. (1993). Assessing the paradigm of mutually exclusive erosion and deposition of mud, with examples from upper Chesapeake Bay. *Marine Geology* 114, 37-57.
- Scully, M.E. (2001). Modeling of critically-stratified gravity flows: application to the Eel River continental shelf, northern California, *Thesis of the Faculty of the School of Marine Science, The college of William and Mary*, 101 p.
- Scully, M.E., Friedrichs, C.T. & Wright, L.D. (2002). Application of an analytical model of critically stratified gravity-driven sediment transport and deposition to observations from the Eel River continental shelf, Northern California. *Continental Shelf Research*, 22 (14), 1951-1974.
- Segall, M.P. & Kuehl, S.A. (1992). Sedimentary processes on the Bengal continental shelf as revealed by clay-size mineralogy. *Continental shelf research* 12, 517-541.
- Shepard, F.P. (1932). Sediments on continental shelves. *Geological Society of America Bulletin* 43, 1017-1034.
- Sloan, J., Miller, J.R. & Lancaster, N. (2001). Response and recovery of the Eel River, California, and its tributaries to floods in 1955, 1964, and 1997. *Geomorphology* 36, 129-154.
- Sommerfield, C.K., Nittrouer, C.A. & Alexander, C.R. (1999). <sup>7</sup>Be as a tracer of flood sedimentation on the northern California continental margin. *Continental Shelf Research* 19, 335-361.
- Sommerfield, C.K. & Nittrouer, C.A. (1999). Modern accumulation rates and a sediment budget for the Eel shelf: a flood-dominated depositional environment. *Marine Geology* 154, 227-241.
- Sommerfield, C.K., Drake, D.E. & Wheatcroft, R.A. (2002). Shelf record of climatic changes in flood magnitude and frequency, north-coastal California. *Geology* 30 (5), 395-398.
- Sternberg, R.W. (1981). Sedimentation processes on continental shelves. In: Haq, B.U. & Milliman, J.D. (Editors). *Marine geology and oceanography of Arabian sea and coastal Pakistan*. Scientific and Academic Editions, New York, 137-157.
- Su, C.-C. & Huh, C.-A. (1999). Sedimentation dynamics in the East China Sea elucidated from <sup>210</sup>Pb, <sup>137</sup>Cs, <sup>239,240</sup>Pu. *Marine Geology* 160, 183-196.
- Swift, D.J.P. (1970). Quaternary shelves and the return to grade. *Marine Geology* 8, 5-30.
- Swift, D.J.P., Stanley, D.J. & Curray, J.R. (1971). Relict sediments on continental shelves: a reconsideration. *Journal of Geology* 79 (3), 322-346.
- Syvitski, J.P. & Morehead, M.D. (1999). Estimating river-sediment discharge to the ocean: application to the Eel margin, northern California. *Marine Geology* 154, 13-28.

- Tessier, B.** (1992). Upper intertidal rhythmites in the Mont-Saint-Michel Bay (NW France): perspectives for paleoreconstruction. *Marine Geology* 110, 355-367.
- Trowbridge, J.H. & Nowell, A.R.M.** (1994). An introduction to the sediment Transport Events on Shelves and Slopes (STRESS) Programm. *Continental Shelf Research* 14 (10/11), 1057-1061.
- Verger, F.** (1970). Carte géomorphologie de l'anse de l'Aiguillon. Association des amis et anciens de l'Institut de géographie de l'Université de Paris.
- Verlaan, P.A.J. & Spanhoff, R.** (2000). Massive sedimentation events at the mouth of the Rotterdam waterway. *Journal of Coastal Research* 16 (2), 458-469.
- Wheatcroft, R.A.** (2000). Oceanic flood sedimentation: a new perspective. *Continental Shelf Research* 20, 2059-2066.
- Wheatcroft, R.A.** (2000). Flood sedimentation on the Pacific northwest continental margin. Introducing Research in the college of Oceanic & Atmospheric Sciences: [http://www.oce.orst.edu/Publications/page\\_19.pdf](http://www.oce.orst.edu/Publications/page_19.pdf)
- Wheatcroft, R.A., Borgeld, J.C., Born, R.S., Drake, D.E., Leithold, E.L., Nittrouer, C.A. & Sommerfield, C.K.** (1996). The anatomy of an oceanic flood deposit. *Oceanography* 9 (3), 158-162.
- Wheatcroft, R.A., Sommerfield, C.K., Drake, D.E., Borgeld, J.C. & Nittrouer, C.A.** (1997). Rapid and widespread dispersal of flood sediment on the northern California margin. *Geology*, 25 (2), 163-166.
- Wheatcroft, R.A. & Borgeld, J.C.** (2000). Oceanic flood deposits on the northern California shelf: large-scale distribution and small-scale physical properties. *Continental Shelf Research* 20, 2163-2190.
- Wright, J.D., Wiseman, W.J., Yang, Z.-S., Bornhold, B.D., Keller, G.H., Prior, D.B. & Suhayda, J.N.** (1990). Processes of marine dispersal and deposition of suspended silts off the modern mouth of the Huanghe (Yellow River). *Continental Shelf research* 10, 1-40.
- Wright, L.D. & Nittrouer, C.A.** (1995). Dispersal of river sediments in coastal seas: six contrasting cases. *Estuaries* 18 (3), 494-508.
- Wright, L.D., Schaffner, L.C. & Maa, J.P.-Y.** (1997). Biological mediation of bottom boundary layer processes and sediment suspension in the lower Chesapeake Bay. *Marine Geology* 141, 27-50.
- Xu, J.P., Noble, M., Eittreim, S.L., Rosenfeld, L.K., Schwing, F.B. & Pilskaln, C.H.** (2002). Distribution and transport of suspended particulate matter in Monterey Canyon, California. *Marine Geology* 181, 215-234.
- Yang, S.Y., Jung, H.S., Choi, M.S. & Li, C.X.** (2002). The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 201, 407-419.

### **Figures sédimentaires (sillons, mégarides) et systèmes de reconnaissance**

- Arbouille** (1987). La sédimentation de la plate-forme continentale Nord-aquitaine au Quaternaire terminal: un exemple de système transgressif. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Bordeaux I*, 196 p.
- Augris, C. & Clabaut, P.** (2001). Cartographie géologique des fonds marins côtiers. Exemples le long du littoral français. Bilans et prospectives. *IFREMER, Brest*, 75 p.
- Berné, S.** (2002). Evolution of sand banks. *Comptes Rendus Geoscience* 334, 731-732.
- Berné, S., Augustin, J.-M., Braud, F., Chene, G. & Walker, P.** (1986). Cartographie et interprétation de la dynamique sédimentaire des plates-formes continentales: améliorations de la technique d'observation par sonar latéral. *Bulletin de la Société Géologique de France* 8 (3), 437-446.
- Berné, S., Auffret, J.-P. & Walker, P.** (1988). Internal structure of subtidal sandwaves revealed by high-resolution seismic reflection. *Sedimentology* 35, 5-20.
- Berné, S., Allen, G., Auffret, J.-P., Chamley, H., Durand, J. & Weber, O.** (1989). Essai de synthèse sur les dunes hydrauliques géantes tidales actuelles. *Bulletin de la Société Géologique de France* 8 (6), 1145-1160.
- Cacchione, D.A., Drake, D.E., Grant, W.D. & Tate, G.B.** (1984). Rippled scour depressions on the inner continental shelf off central California. *Journal of Sedimentary Petrology* 54, 1280-1291.
- Chavez, P.S., Isbrecht, J., Galanis, P., Gabel, G.L., Sides, S.C., Soltesz, D.L., Ross, S.L. & Velasco, M.G.** (2002). Processing, mosaicking and management of the Monterey Bay digital sidescan-sonar images. *Marine Geology* 181, 305-315.
- Cirac, P., Berné, S., Castaing, P. & Weber, O.** (2000). Processus de mise en place et d'évolution de la couverture sédimentaire superficielle de la plate-forme nord-aquitaine. *Oceanologica Acta* 23 (6), 663-686.
- Cochrane, G.R. & Lafferty, K.D.** (2002). Use of acoustic classification of sidescan sonar data for mapping benthic habitat in the Northern Channel Islands, California. *Continental Shelf Research* 22 (5), 683-690.

- Ferrini, V. & Flood, R.D.** (2002). Multibeam sonar on the inner shelf of the Eel margin: nearshore gravel-floored troughs. *Eos Trans. AGU*, 83 (47). Abstract OSC-0297.
- Flood, R.D.** (1981). Distribution, morphology, and origin of sedimentary furrows in cohesive sediments, Southampton water. *Sedimentology* 28, 511-529.
- Flood, R.D.** (1983). Classification of sedimentary furrows and a model for furrow initiation and evolution. *Geological Society of America Bulletin* 94, 630-639.
- Gabeloteau, I.** (1994). Validité et utilisation des données sédimentologiques anciennes obtenue à l'aide du plomb suiffé. *INTECHMER/EPHOM*, 68 p.
- Garlan, T.** (1995). Caractérisation des fonds et des sédiments sous-jacents du plateau continental au domaine océanique. *Revue Scientifique et Technique de la Défense* 2, 169-172.
- Garlan, T.** (1995). La cartographie des sédiments du littoral français. Résultats et objectifs. *Journal de la Recherche Océanographique* 20 (1-2), 50-54.
- Garnaud, S.** (1998). Réalisation de la carte sédimentologique 6333G "De l'île de Ré à l'île d'Oléron". Rapport final. *EPHOM*, Brest, 16 p.
- Garnaud, S.** (2002). Carte sédimentologique de la Pointe du Cou à la Pointe de Chassiron (Pertuis Breton et Charentais) 7404G. SHOM.
- Garnaud, S. & Garlan, T.** (1998). Dynamique sédimentaire du pertuis d'Antioche (Charente-Maritime). La carte sédimentologique 6333G du SHOM. *17<sup>ème</sup> Réunion des Sciences de la Terre*, Brest, 31 mars au 3 avril 1998, 118-119.
- Germano, J.D.** (2002). Sediment Profile Imaging (SPI), rapid seafloor reconnaissance and assessment. <http://www.remots.com>
- Hunter, R.E., Thor, D.R. & Swiher, M.L.** (1982). Depositional and erosional features of the inner shelf, northeastern Bering Sea. *Geologie en Mijnbouw* 61, 49-62.
- Hunter, R.E., Dingler, J.R., Anima, R.J. & Richmond, B.M.** (1988). Coarse-sediment bands on the inner shelf of Southern Monterey bay, California. *Marine Geology* 80, 81-98.
- Knebel, H.J., Needell, S.W. & O'Hara, C.J.** (1982). Modern sedimentary environments on the Rhode Island inner shelf, off the eastern United States. *Marine Geology* 49, 241-256.
- Knebel, H.J. & Poppe, L.J.** (2000). Sea-floor environments within Long Island Sound: a regional overview. *Journal of Coastal Research* 16, 533-550.
- Mallet, C.** (1998). Carte sédimentologique de l'embouchure de la Gironde "de la pointe de la Coubre à la pointe de la Négade". SHOM.
- Migeon, S., Weber, O., Faugeres, J.C. & Saint-Paul, J.** (1999). SCOPIX: a new imaging system for core analysis. *Geo-Marine Letters* 18, 251-255.
- Morang, A. & McMaster, R.L.** (1980). Nearshore bedform patterns along Rhode Island from side-scan sonar surveys. *Journal of Sedimentary Petrology* 50 (3), 831-840.
- O'Connor, B.D.S., Costelloe, J., Keegan, B.F. & Rhoads, D.C.** (1989). The use of Remots technology in monitoring coastal enrichment resulting from mariculture. *Marine Pollution Bulletin* 30 (8), 384-390.
- Poppe, L.J., Knebel, H.J., Lewis, R.S. & DiGiacomo-Cohen, M.L.** (2002). Processes controlling the remobilization of superficial sediment and formation of sedimentary furrows in north-central Long Island sound. *Journal of Coastal Research* 18 (4), 741-750.
- Reimnitz, E., Toimil, L.J., Shepard, F.P. & Gutiérrez-Estrado, M.** (1976). Possible rip-current origin for bottom ripple zone to 30-m depth. *Geology* 4, 395-400.
- Rhoads, D.C. & Germano, J.D.** (1982). Characterization of organism-sediment relations using sediment profile imaging: an efficient method of remote ecological monitoring of the sea-floor (REMOTS system). *Marine Ecology Progress Series* 8, 115-128.
- Shipp, R.C.** (1984). Bedforms and depositional sedimentary structures of a barred nearshore system, eastern Long Island, New York. *Marine Geology* 60, 235-259.
- Swift, D.J.P.** (1978). Current lineations and sand waves on the inner shelf, Middle Atlantic Bigh of North America. *Journal of Sedimentary Petrology* 48 (4), 1257-1266.
- Swift, D.J.P., Freeland, G.L. & Young, R.A.** (1979). Time and space distribution of megaripples and associated bedforms, Middle Atlantic Bigh, North American Atlantic shelf. *Sedimentology* 26, 389-406.
- Turcq, B.** (1984). Faciès et formes sédimentaires du plateau continental nord aquitain, réponse aux processus hydrodynamiques actuels. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Bordeaux*, 192 p.
- Turcq, B., Cirac, P., Berné, S. & Weber, O.** (1986). Caractéristiques des environnements sédimentaires de la plate-forme continentale nord-aquitaine en relation avec les processus hydrodynamiques actuels. *Bulletin de l'Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine* 39, 149-164.

- Twichell, D.C., Zajac, R.N., Poppe, L.J., Lewis, R.S., Cross, V., Nichols, D. & DiGiacomo-CohenMary, L.** (1998). Bathymetric, sidescan sonar image, and superficial geologic interpretation of Long Island Sound off Norwalk, Connecticut. *US Geological Survey, Woods Hole*, New York, <http://pubs.usgs.gov/openfile/of98-502/chapt502/502norwalk/frontp502.htm>
- Walker, P.** (2002). Dynamique sédimentaire dans le golfe normand-breton. Intérêt de l'imagerie par sonar à balayage latéral. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, 289 p.

### **Transports sédimentaires Méthode de Gao et Collins et applications**

- Asselman, N.E.M.** (1996). A GIS-based method for the identification of sediment transport paths from grain size trends. <http://www.geog.uu.nl/pcraster/exmod/grainsize/grainsize.html>
- Asselman, N.E.M.** (1999). Grain-size trends used to assess the effective discharge for floodplain sedimentation, river Waal, The Netherlands. *Journal of Sedimentary Research* 69 (1), 51-61.
- Carrigny, J.D. & Sanchez, A.** (1999). Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly of discharge loss. *Marine Geology* 158, 125-145.
- Carrigny, J.D., Sanchez, A. & Camacho-Ibar, V.F.** (2001). Sedimentation in the northern gulf of California after cessation of the Colorado River discharge. *Sedimentary Geology* 144, 37-42.
- Chang, Y.H., Scrimshaw, M.D. & Lester, J.N.** (2001). A revised grain-size trend analysis program to define net sediment transport pathways. *Computers & Geosciences* 27 (1), 109-114.
- Ehrhold, A.** (1999). Dynamique de comblement d'un bassin sédimentaire soumis à un régime mégatidal: exemple de la Baie du Mont-Saint-Michel. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen*, Caen, 294 p.
- Ehrhold, A. & Auffret, J.-P.** (1996). Approche bi-dimensionnelle des transports sédimentaires à partir des variations granulométriques des sédiments superficiels: exemple de la partie occidentale de la Baie du Mont-Saint-Michel. *IV<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier*, Dinard, 277-284.
- Garnaud, S., Poizot, E., Méar, Y., Lesueur, P., Lesourd, S. & Brun-Cottan, J.-C.** (2001). Transport sédimentaire résiduel en domaine subtidal: application et amélioration de l'approche de Gao et Collins à la Baie de Seine orientale. *8<sup>ème</sup> Congrès Français de Sédimentologie - Livre des résumés*. ASF, Paris, Orléans, 163-164.
- Gao, S.** (1996). A fortran program for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways. *Computers & Geosciences* 22 (4), 449-452.
- Gao, S. & Collins, M.** (1991). A critique of the "Mc Laren method" for defining sediment transport paths. *Journal of Sedimentary Petrology* 61, 143-146.
- Gao, S. & Collins, M.** (1992). Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". *Sedimentary geology* 80, 47-60.
- Gao, S. & Collins, M.** (1994). Analysis of grain-size trends for defining sediment transport pathways in marine environment. *Journal of Coastal Research* 10 (1), 70-78.
- Gao, S. & Collins, M.** (1994). Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"-reply. *Sedimentary geology* 90, 157-159.
- Gao, S., Collins, M., Lanckneus, J., De Moor, G. & Van Lanckner, V.** (1994). Grain size trends associated with net transport sediment patterns: an example from the Belgian continental shelf. *Marine Geology* 121, 171-185.
- Gao, S. & Collins, M.** (1995). Net Sand Transport Direction in a Tidal Inlet, using Foraminiferal Tests as Natural Tracers. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 40 (6), 681-697.
- Lanckness, J., De Moor, G., De Schaepmeester, G., Meyus, I. & Spiers, V.** (1992). Residual sediment transport directions on a tidal sand bank. *Bulletin de la Société Belge d'Etudes Géographiques* 2, 425-446.
- Le Bot, S.** (2001). Morphodynamique de dunes sous-marines sous influence des marées et des tempêtes. Processus hydro-sédimentaires et enregistrement. Exemple du Pas-de-Calais. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Lille I*, 272 p.
- Le Bot, S., Trentesaux, A. & Ehrhold, A.** (2001). Contrôle exercé par les bancs sableux sur la morpho-dynamique des dunes. Apports pour la modélisation du transport sédimentaire résiduel par la méthode de Gao et Collins. *8<sup>ème</sup> Congrès Français de Sédimentologie - Livre des résumés*. ASF, Paris, Orléans, 211-212.
- Le Roux, J.P.** (1994). An alternative approach to the identification of net transport paths based on grain-size trends. *Sedimentary Geology* 94, 97-107.
- Le Roux, J.P.** (1994). Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". *Sedimentary Geology* 90, 153-156.
- Le Roux, J.P., O'Brien, R.D., Rios, F. & Cisternas, M.** (2002). Analysis of sediment transport paths using grain-size parameters. *Computers & Geosciences* 28, 717-721.

- Mallet, C., Howa, H., Garlan, T., Sottolochio, A. & Le Hir, P.** (2000). Residual transport model in correlation with sedimentary dynamics over an elongate tidal sandbar in the Gironde estuary (southwestern France). *Journal of Sedimentary Research* 70 (5), 1005-1016.
- Mallet, C., Howa, H., Garlan, T., Sottolochio, A., Le Hir, P. & Michel, D.** (2000). Utilisation of numerical and statistical techniques to describe sedimentary circulation patterns in the mouth of the Gironde estuary. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris* 331, 491-497.
- Masselink, G.** (1992). Longshore variation of grainsize distribution along the coast of the Rhône Delta, Southern France: a test of "McLaren Model". *Journal of Coastal Research* 8 (2), 286-291.
- Mc Laren, P.** (1981). An interpretation of trends in grain-size measure. *Journal of Sedimentary Petrology* 51, 611-624.
- Mc Laren, P. & Bowles, D.** (1985). The effects of sediment transport on grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology* 55, 457-470.
- Pedrerros, R., Howa, H.L. & Michel, D.** (1996). Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas. *Marine Geology* 135 (1-4), 35-49.
- Poizot, E., Thomas, M., Méar, Y. & Garnaud, S.** (soumis). GIS Based Grain Size Trend Analysis Of The South Eastern Bay Of Seine, France. *Journal of Coastal Research*.
- Stepanian, A.** (1997). Détermination de la direction de transport des sédiments en domaine intertidal. *Mémoire de maîtrise de Sciences de l'Environnement, option Océanologie, Université de Bordeaux I*, 24 p.
- Vanwesenbeeck, V. & Lanckneus, J.** (2000). Residual sediment transport paths on a tidal sand bank: a comparison between the modified Mc Laren model and bedform analysis. *Journal of Sedimentary Research* 70 (3), 470-477.
- Wu, J.X. & Shan, H.T.** (1999). Estuarine bottom sediment transport based on the 'McLaren model': a case study of Huangmaohai Estuary, South China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49, 265-279.

## Climatologie

- Blackford, J.J. & Chambers, F.M.** (1995). Proxy climate of the last 10,000 years from Irish blanket peat and a possible link to solar variability. *Earth and Planetary Science Letters* 133, 145-150.
- Briffa, K.R., Bartholin, T.S., Eckstein, D., Jones, P.D., Karlén, W., Schweingruber, F.H. & Zetterberg, P.** (1990). A 1400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia. *Nature* 391, 678-682.
- Fairbanks, R.G.** (1989). A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature* 342, 637-642.
- Grove, J.M.** (1988). The Little Ice Age. *Methuen*, London, 498 p.
- Grove, J.M.** (2001). The initiation of the "Little Ice Age" in regions round the North Atlantic. *Climatic Change* 48, 53-82.
- Inman, D.L. & Jenkins, S.A.** (1999). Climatic change and the episodicity of sediment flux of small California rivers. *Journal of Geology* 107, 251-270.
- Knox, J.C.** (2000). Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change. *Quaternary Science Reviews* 19, 439-457.
- Lamb, H.H.** (1979). Climatic variation and changes in the wind and ocean circulation: the Little Ice Age in the northeast Atlantic. *Quaternary Research* 11, 1-20.
- Le Roy Ladurie, L.** (1983). Histoire du climat depuis l'An Mil (2 volumes). *Flammarion*, 541 p.
- Mitchell, T.D., Hulme, M. & New, M.** (2002). Climate data for political areas. *Area* 34, 109-112.
- Rîmbu, N., Boroneant, C., Buta, C. & Dima, M.** (2002). Decadal variability of the Danube river flow in the lower basin and its relation with the North Atlantic Oscillation. *International Journal of Climatology* 22 (10), 1169-1179

## Livres généraux

- Chamley, H.** (1989). Clay sedimentology. *Springer-Verlag*, 623 p.

- Chamley, H.** (2002). Environnements géologiques et activités humaines. L'impact des activités humaines sur le milieu naturel. Collection Sciences de la Terre et de l'Univers. *Vuibert*, 512 p.
- Holzapffel, T.** (1985). Les minéraux argileux. Préparation. Analyses diffractométriques et détermination, 12. *Société géologique du Nord*, Université de Lille, 136 p.
- McManus, J.** (1988). Grain size determination and interpretation. In: Tucker, M. (Editor), Techniques in Sedimentology. *Blackwell*, Oxford, 63-85.
- Moore, D.M. & Reynolds, R.C.** (1989). X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. *Oxford University Press*, 332 p.
- Spiegel, M.R.** (1961). Theory and problems of statistics: schaum's outline series. *McGraw-Hill Book Co.*, New York, 359 p.

### Autres

- Blanchart, E., King, D., Le Bissonnais, Y., Bourguignon, A., Souchère, V., Desprats, J.-F. & Maurizot, P.** (1999). Paramétrisation du potentiel de ruissellement des bassins versants au moyen de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques. *Etude et Gestion des Sols* 6 (3), 181-199.
- Jamagne, M., Hardy, R., King, D. & Bornand, M.** (1995). La base de donnée géographique des sols de France. *Etude et Gestion des Sols* 2 (3), 153-172.
- Javelle, P.** (2001). Caractérisation du régime des crues: le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG)*, 277 p.
- King, D., Jamagne, M., Arrouays, D., Bornand, M., Favrot, J.C., Hardy, R., Le Bas, C. & Stengel, P.** (1999). Inventaire cartographique et surveillance des sols en France. Etat d'avancement et exemples d'utilisation. *Etude et Gestion des Sols* 6 (4), 215-228.

## Liste des figures et tableaux

---

## LISTE DES FIGURES

### Introduction

<b>Figure In-1.</b> Localisation des dépôts vaseux en Manche .....	1
<b>Figure In-2.</b> Carte des faciès sédimentaires de la Baie de Seine orientale (données sédimentaires 1995-1998) (Lesourd, 2000).....	2
<b>Figure In-3.</b> Estuaire et embouchure de la Seine. Estuaire moyen: zone de mélange entre eaux douce/salée, présence du bouchon vaseux. Estuaire moyen: limite de l'intrusion saline, zone soumise à la marée. ....	3

### Chapitre I

<b>Figure I-1.</b> a/ Géomorphologie du plateau continental nord-aquitain. b/ Carte du plateau continental de l'Amazonie large de 100 à 300 km .....	15
<b>Figure I-2.</b> Apport annuel de charges solides (millions de tonnes par an) en domaine océanique en provenance de grands bassins versants (Milliman & Meade, 1983; Milliman, 1990) .....	16
<b>Figure I-3.</b> Apports de matières solides en Asie (Milliman & Meade, 1983) .....	17
<b>Figure I-4.</b> Les cinq cas typiques d'accumulation des vases sur les plates-formes continentales (McCave, 1972) .....	19
<b>Figure I-5.</b> Exemples de situations des sédiments fins vaseux sur différentes plates-formes mondiales actuelles .....	21
<b>Figure I-6.</b> Diagramme conceptuel illustrant le couplage des processus physiques et biologiques du transport particulaire en domaine de plate-forme interne et médiane (Nittrouer & Wright, 1994) .....	22
<b>Figure I-7.</b> Schéma conceptuel des deux types de plume turbide pouvant exister en mer (modifié d'après Wright & Nittrouer, 1995).....	24
<b>Figure I-8.</b> Carte des principaux faciès sédimentaires en Manche et des aires de dépôts des sédiments fins (Larsonneur <i>et al.</i> , 1982) .....	26
<b>Figure I-9.</b> Carte simplifiée des formations géologiques de la Baie de Seine (Lesueur <i>et al.</i> , 2003).....	27
<b>Figure I-10.</b> Plate-forme émergée de la Manche lors de la dernière période glaciaire .....	29
<b>Figure I-11.</b> Carte des sédiments superficiels de la Baie de Seine (Larsonneur, 1977) .....	31
<b>Figure I-12.</b> Deltas de jusant de l'Orne et de la Dives sur la côte du Calvados.....	33
<b>Figure I-13.</b> a,b. Cartes des courants de marée à BM-3 et BM en Baie de Seine orientale extraites de l'atlas édité par le SHOM (1996) .....	35
<b>Figure I-13.</b> c,d. Cartes des courants de marée à BM+2 et BM+4 en Baie de Seine orientale extraites de l'atlas édité par le SHOM (1996) .....	36
<b>Figure I-14.</b> Corrélation entre le débit moyen annuel de la Seine et les précipitations enregistrées à la même période en France (source des données des précipitations, Mitchell <i>et al.</i> , 2002) .....	38
<b>Figure I-15.</b> Apports solides annuels au barrage de Poses entre 1993 et 2001 .....	38
<b>Figure I-16.</b> Débits moyens annuels des rivières et fleuves débouchant en Baie de Seine .....	39
<b>Figure I-17.</b> Position du bouchon vaseux de la Seine en fonction du régime hydrologique de la Seine et des conditions de marée (d'après Avoine, 1981).....	41
<b>Figure I-18.</b> Le panache turbide de la Seine, contraste entre deux masses d'eau (février 2000) .....	42
<b>Figure I-19.</b> Situation du panache turbide de la Seine par différentes conditions .....	43
<b>Figure I-20.</b> Profils verticaux NS de la turbidité dans les eaux de la Baie de Seine en période de crue (1982) et par des conditions d'agitation différentes: mer calme (a) et agitée (b) (d'après Avoine <i>et al.</i> , 1984) .....	44
<b>Figure I-21.</b> Rose des vents au Cap de la Hève selon leur intensité sur l'échelle de Beaufort .....	45
<b>Figure I-22.</b> Histogrammes de la hauteur moyenne et de la période des vagues entre 1997 et 2001 .....	45

### Chapitre II

<b>Figure II-1.</b> Drague utilisée dans les fonds meubles et peu profonds de la Baie de Seine lors des campagnes de prélèvements effectuées entre 1960 et 1975 (Larsonneur, 1964).....	60
---	----

<b>Figure II-2.</b> Benne Shipeck et carottier Reineck utilisés lors des missions VASTEDEBA et BENTHOSEINE.....	61
<b>Figure II-3.</b> Répartition des faciès sédimentaires dans la partie sud de l'embouchure de la Seine en 1834.....	63
<b>Figure II-4.</b> Répartition des faciès sédimentaires dans la partie sud de l'embouchure de la Seine en 1880.....	65
<b>Figure II-5.</b> Carte topographique de l'embouchure de la Seine réalisée entre 1854 et 1855 par les ingénieurs du SHOM.....	64
<b>Figure II-6.</b> Répartition des faciès sédimentaires dans la partie sud de l'embouchure de la Seine en 1894.....	67
<b>Figure II-7.</b> Répartition des faciès sédimentaires dans la partie sud de l'embouchure de la Seine en 1913.....	68
<b>Figure II-8.</b> Chronologie des aménagements de la Seine depuis le XIX <sup>ème</sup> siècle (Lesueur & Lesourd, 1999).....	69
<b>Figure II-9.</b> Carte de répartition de la teneur en fraction fine (< 50 µm) en Baie de Seine orientale en 1967 (Garnaud <i>et al.</i> , soumis).....	71
<b>Figure II-10.</b> Carte de répartition teneurs en fraction fine (< 50 µm) en Baie de Seine orientale en 1977 d'après Avoine (1986) (Garnaud <i>et al.</i> , soumis).....	72
<b>Figure II-11.</b> Epaisseur de la couverture meuble superficielle en centimètres d'après les données de carottage (triangles) et de bennes (points) effectués de 1977 à 1982 (Larsonneur & Avoine, 1981).....	73
<b>Figure II-12.</b> Carte des stations de prélèvements des missions VASTEDEBA I et II dans la partie sud-orientale de la Baie de Seine.....	73
<b>Figure II-13.</b> Carte de la répartition de la fraction fine contenue dans les sédiments de la Baie de Seine sud-orientale en 2000 (Garnaud <i>et al.</i> , soumis).....	74
<b>Figure II-14.</b> Histogramme des surfaces envasées en fonction de leurs teneurs en fraction fine en Baie de Seine sud-orientale entre 1967, 1977 et 2000 (Garnaud <i>et al.</i> , soumis).....	75

### **Chapitre III**

<b>Figure III-1.</b> Position des stations de prélèvements réalisés au cours des missions FLUXMANCHE, SEAWAIN et VASTEDEBA.....	87
<b>Figure III-2.</b> Compilation des données du pourcentage des particules fines présentes dans les fonds de la Baie de Seine orientale entre 1995 et 1999.....	88
<b>Figure III-3.</b> Conditions hydrologiques de la Seine lors des missions en mer. Débits liquides mesurés au barrage de Poses.....	90
<b>Figure III-4.</b> Localisation de l'ensemble des stations de prélèvements réalisées entre septembre 1998 et juin 2001 (environ 500 sites) en Baie de Seine sud orientale.....	90
<b>Figure III-5.</b> Cartes de répartition de la fraction carbonatée en Baie de Seine sud-orientale.....	92
<b>Figure III-6.</b> Distribution 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 VASTEDEBA 2000.....	93
<b>Figure III-7.</b> Mode granulométrique principal de la fraction sédimentaire totale de la couverture sédimentaire superficielle de la Baie de Seine sud-orientale (Garnaud & Lesueur, 2001).....	94
<b>Figure III-8.</b> Cartes de la répartition des indices sédimentologiques.....	95
<b>Figure III-9.</b> Localisation des profils de sonar à balayage latéral réalisés lors des missions VASTEDEBA II et III.....	97
<b>Figure III-10.</b> Localisation des sillons coquilliers en Baie de Seine sud-orientale d'après l'interprétation des images de sonar à balayage latéral (juin 2000 et 2001).....	99
<b>Figure III-11.</b> Exemple de sonogramme obtenu sur le secteur des sillons coquilliers au large d'Houlgate.....	100
<b>Figure III-12.</b> Extraits de sonogrammes montrant la disposition des sillons coquilliers au large d'Houlgate.....	101
<b>Figure III-13.</b> Disposition des coquilles brisées correspondant au remplissage des sillons.....	102
<b>Figure III-14.</b> a) Sonogramme montrant les deux faciès sédimentaires rencontrés en Baie de Morlaix (Auffret <i>et al.</i> , 1992), b) photographie sous-marine des graviers coquilliers, c) enregistrement de sonar à balayage latéral sur le plateau continental nord-aquitain.....	105
<b>Figure III-15.</b> Sonogrammes des différentes formes de mégarides rencontrées en Baie de Seine sud-orientale.....	107
<b>Figure III-16.</b> a et b/ Voiles sableux présents au large de Ouistreham. c/ rose de courant de marée sur le site n°1152 au large de Ouistreham: 49°18,6'N et 00°14,4'W.....	108
<b>Figure III-17.</b> Extrait de sonogrammes présentant l'échofaciès type des argiles compactes affleurant dans les fonds subtidiaux au large de Cabourg, localisation sur la Figure III-9 (d'après Garnaud <i>et al.</i> , 2002).....	110

<b>Figure III-18.</b> Zone d'affleurement des argiles reliques entre Cabourg et Villers-sur-mer d'après l'interprétation des levés de sonar à balayage latéral (argiles affleurantes) et de l'ensemble des bennes et carottages effectués (argiles subaffleurantes).....	109
<b>Figure III-19.</b> a/ Sonogramme caractéristique des fonds marins constitués de balanes et de moules juvéniles (faciès sombre et digité vers l'est) dans un environnement composé de sables fins (faciès clair) au large de Deauville. b/ Photographie des squelettes de grandes balanes et de moules récoltées sur le faciès sombre.....	112
<b>Figure III-20.</b> Sonogramme montrant des casiers à crustacés posés sur le fond au large de Deauville.....	113
<b>Figure III-21.</b> Impact des chalutages sur un fond où les argiles fossiles sont subaffleurantes, entraînant ainsi de larges et profondes empreintes et b/ sur un fond sablo-vaseux où les empreintes sont moins profondes; elles s'atténuent et s'estompent rapidement du fait de la mobilité des fonds sédimentaires.....	114
<b>Figure III-22.</b> Situation de la distribution des traces de chalut observées à partir des enregistrements au sonar à balayage latéral en Baie de Seine sud-orientale entre 2000 et 2001.....	113
<b>Figure III-23.</b> Carte de répartition de la fraction fine contenue dans les sédiments de la Baie de Seine sud-orientale en période hivernale (février 2000).....	116
<b>Figure III-24.</b> Carte de répartition de la fraction fine contenue dans les sédiments de la Baie de Seine sud-orientale en période de début d'été (juin 2001).....	116
<b>Figure III-25.</b> Evolution saisonnière de la répartition de la fraction fine (< 50 µm) du sédiment total à l'embouchure de l'Orne (d'après Dubrulle, 1982 et Avoine 1978, données non publiées: étiage 1977 et crue 1978).....	118
<b>Figure III-26.</b> Distribution de la fraction fine contenue dans les sédiments superficiels à l'embouchure de la Seine entre juin 2001 et septembre 1998 (à suivre).....	120
<b>Figure III-26 (suite).</b> Distribution de la fraction fine contenue dans les sédiments superficiels à l'embouchure de la Seine entre février-septembre 1996 et septembre-novembre 1993.....	121
<b>Figure III-27.</b> Evolution saisonnière de la couverture sédimentaire dans la partie orientale de la Baie de Seine (modifié d'après Avoine, 1994).....	123
<b>Figure III-28.</b> Répartition des MES dans les eaux de surface de la partie orientale de la Baie de Seine dans les conditions les plus favorables à leurs expulsions (marée de vives-eaux et basse mer) en période d'étiage (septembre 1981) et de crue (mars 1982) (Avoine <i>et al.</i> , 1986).....	122
<b>Figure III-29.</b> Histogramme des surfaces envasées en fonction des teneurs en fraction fine en Baie de Seine sud-orientale.....	125
<b>Figure III-30.</b> Variabilité temporelle de la fraction fine contenue dans les sédiments superficiels de Baie de Seine sud-orientale entre 1995 et 2000 sur le même secteur d'étude (modifié d'après Garnaud <i>et al.</i> , 2002).....	127
<b>Figure III-31.</b> Localisation des radiales suivies (FL01-FL21 et FL42-FL22) et du point fixe sur la zone atelier de la Baie de Seine sud-orientale pour l'étude des variations à haute fréquence de la sédimentation fine.....	126
<b>Figure III-32.</b> Evolution spatio-temporelle de la distribution de la fraction fine sur le secteur atelier des radiales FLUXMANCHE et sur des points proches.....	130
<b>Figure III-33.</b> Exemple d'enregistrement des variations verticales de la couverture sédimentaire par carottages courts de type Reineck suivi sur le site du point fixe en mars 1999, mai 1999 et mars 2000.....	128
<b>Figure. III-34.</b> Position des radiales au large de Villers-sur-Mer.....	131
<b>Figure III-35.</b> Teneurs en fraction fine dans les sédiments superficiels en février 2000 et mai 2001 sur la radiale SEAWAIN située à l'est de Houlgate.....	132
<b>Figure III-36.</b> Teneurs en fraction fine dans les sédiments superficiels sur la radiale FLUXMANCHE prolongée vers le large entre février 2000 et mai 2001.....	132
<b>Figure III-37.</b> Images sous-marines enregistrées sur l'une des radiales suivies en mai 1999.....	133
<b>Figure III-38.</b> Clichés REMOTS-SPI réalisés en Baie de Seine sud-orientale lors du programme FLUXMANCHE.....	135
<b>Figure III-39.</b> Evolution spatio-temporelle le long des radiales ateliers depuis les missions FLUXMANCHE (janvier-février 1995), BENTHOSEINE 98 (septembre 1998), BENTHOSEINE 99 (mars et mai 1999) et VASTEDEBA (Février et juin 2000, mai et juin 2001).....	137
<b>Figure III-40.</b> Bilan de l'envasement de la zone atelier au large de Villers-sur-Mer depuis 1995 sur la zone de la vasière subtidale (radiale de référence FL22-FL37).....	136
<b>Figure III-41.</b> Cartes de synthèse de la répartition des fractions fines dans l'embouchure au cours de la période 1993-1996 (d'après Lesourd, 2000).....	139

<b>Figure III-42.</b> Teneurs en fraction fine présentes dans les sédiments superficiels prélevés au droit du port d'Antifer en septembre 1998 (BENTHOSEINE 1998) et mars 1999 (BENTHOSEINE 1999).....	140
<b>Figure III-43.</b> Modalités des fluctuations saisonnières de la couverture sédimentaire en Baie de Seine orientale.....	141
<b>Figure III-44.</b> Vecteurs de transport résiduel calculés par la méthode de Gao et Collins pour les cas CB+ en Baie de Seine sud-orientale en février 2000.....	147
<b>Figure III-45.</b> Vecteurs de transport résiduel calculés par la méthode de Gao et Collins pour les cas CB+/FB- en Baie de Seine sud-orientale en février 2000.....	148
<b>Figure III-46.</b> Vecteurs de transport résiduel calculés par la méthode de Gao et Collins pour les cas FB- en Baie de Seine sud-orientale en février 2000.....	149
<b>Figure III-47.</b> Vecteurs de transport résiduel calculés par la méthode de Gao et Collins pour les cas CB+ en Baie de Seine sud-orientale en juin 2001.....	151
<b>Figure III-48.</b> Vecteurs de transport résiduel calculés par la méthode de Gao et Collins pour les cas CB+/FB- en Baie de Seine sud-orientale en juin 2001.....	152
<b>Figure III-49.</b> Vecteurs de transport résiduel calculés par la méthode de Gao et Collins pour les cas FB- en Baie de Seine sud-orientale en juin 2001.....	153
<b>Figure III-50.</b> Exemple du sens du transport sédimentaire directement déduit du sonar à balayage latéral en Baie de Seine sud-orientale: obstacle et queue de comète associée.....	154
<b>Figure III-51.</b> Résultats des expériences de traceurs radioactifs sur différents sites de la Baie de Seine sud-orientale (d'après Avoine <i>et al.</i> , 1984b; Avoine <i>et al.</i> , 1986).....	155
<b>Figure III-52.</b> Superposition des cartes des teneurs en particules fines (< 50 µm) dans les sédiments superficiels et des vecteurs de transports résiduels pour le cas FB- en février 2000 (a) et juin 2001 (b) en Baie de Seine sud-orientale.....	158
<b>Figure III-53.</b> Photographies des coulées boueuses sur l'estran au niveau des falaises des Vaches Noires (Villers-sur-Mer) en juin 2001 (vues depuis le large).....	162
<b>Figure III-54.</b> Carte de la nature des sédiments en Baie de Seine orientale entre Ver-sur-mer et Bénerville (Sudry, 1911).....	166
<b>Figure III-55.</b> Zonéographie des cortèges argileux dans l'estuaire de la Seine et dans la partie orientale de la Baie de Seine (Avoine, 1981).....	168
<b>Figure III-56.</b> Relation kaolinite + smectite / illite + chlorite dans les sédiments de Rouen à la Baie de Seine orientale d'après les données de Lesourd (2000).....	170
<b>Figure III-57.</b> Relation kaolinite + smectite / illite + chlorite dans les sédiments de Rouen à la Baie de Seine orientale à partir de la compilation des données recueillies dans la bibliographie, complétées de notre étude.....	172
<b>Figure III-58.</b> Variations spatiales du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ en Baie de Seine et dans le Golfe normand-breton (Boust, communication personnelle).....	174
<b>Figure III-59.</b> Répartition spatiale du rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans les sédiments superficiels en Baie de Seine sud-orientale (missions SediBaie 1994 et VASTEDEBA 2000).....	176
<b>Figure III-60.</b> Bilan des différentes sources de sédiments fins en Baie de Seine sud-orientale.....	177
<b>Figure III-61.</b> Définition des durées caractéristiques relatifs à un hydrogramme de crue (d'après Javelle, 2001).....	178
<b>Figure III-62.</b> Photographie aérienne de l'embouchure de l'Eel river (Californie du nord) en période de crue "mineure" avec la dispersion de son panache turbide en mer ( <a href="http://www.oce.orst.edu">www.oce.orst.edu</a> ).....	180
<b>Figure III-63.</b> Historique des débits de la Seine mesurés à Poses entre 1941 et 2001.....	183
<b>Figure IV-64.</b> Position du site choisi pour les mesures hydrosédimentaires en Baie de Seine sud-orientale en domaine subtidal.....	184
<b>Figure III-65.</b> Evolution des paramètres hydrosédimentaires au cours du point fixe de 23 septembre (courants de marée et concentrations pondérales en MES) et du 24 septembre (température et salinité) au large de Villers-sur-Mer.....	185
<b>Figure III-66.</b> Evolution des paramètres hydrosédimentaires au cours du point fixe de 18 mai 1999 (coefficient de 103/98, débit de la Seine de $450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) au large de Villers-sur-Mer.....	187
<b>Figure III-67.</b> Evolution des paramètres hydrosédimentaires au cours du point fixe de 28 février 2000 (coefficient de 35-31, débit de la Seine de $1248 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).....	188
<b>Figure III-68.</b> Evolution des paramètres hydrosédimentaires au cours du point fixe de 14 mars 1999 (coefficient de 58, débit de la Seine de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).....	190
<b>Figure III-69.</b> Evolution des paramètres hydrosédimentaires au cours du point fixe de 21 mars 2000 (coefficient de 107, débit de la Seine de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).....	191
<b>Figure III-70.</b> Caractéristiques des MES au cours d'un cycle de marée de très forte vive-eau en situation de crue de la Seine (point fixe du 21/02/2000).....	193

<b>Figure III-71.</b> Historique du débit de la Seine (en gris) pendant la période juillet 1994-novembre 2001 et de la charge particulaire associée (en noir).....	198
<b>Figure III-72.</b> Nombre de jours où le débit de la Seine a été supérieur à $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ depuis 10 ans.....	197

## **Chapitre IV**

<b>Figure IV-1.</b> Etapes du comblement de l'estuaire de la Seine; coupes transversales schématiques (Lefebvre, 1977a).....	219
<b>Figure IV-2.</b> Log stratigraphique de la séquence boréale du port du Havre (écluse François I <sup>er</sup> ) (Guyader, 1977).....	219
<b>Figure IV-3.</b> Localisation des affleurements de tourbe sur le domaine littoral de la Baie de Seine.....	220
<b>Figure IV-4.</b> Localisation des carottes courtes (notées SXXX) et Küllenberg (K002, K002 et K003) réalisées en Baie de Seine sud-orientale entre 1970 et 1980. Log des carottes correspondants (Avoine, 1981, 1994).....	222
<b>Figure IV-5.</b> Carte des isopaques des dépôts holocènes en Baie de Seine sud-orientale (d'après Auffret & D'Ouzouville, 1986).....	223
<b>Figure IV-6.</b> Localisation des carottages réalisées depuis 1999 sur le secteur de la Baie de Seine sud-orientale.....	235
<b>Figure IV-7.</b> Vibrocarottier embarqué à bord du N/O Thalia lors de la mission VASTEDEBA III.....	224
<b>Figure IV-8.</b> Granulométrie des échantillons prélevés sur la carotte 2683.....	236
<b>Figure IV-9.</b> Photographies des carottes 2683 et 2686 prélevées à l'entrée du Parfond et au large de Deauville lors des missions VASTEDEBA III.....	227
<b>Figure IV-10.</b> Granulométrie des échantillons prélevés à pas constant de 10 cm sur la carotte 2686.....	228
<b>Figure IV-11.</b> Radiographie de sections de carottes prélevées en Baie de Seine sud-orientale (clichés positifs, système SCOPIX, université de Bordeaux) et différentes unités distinguées décrites dans le texte.....	231
<b>Figure IV-12.</b> Deux parties de carottes montrant un litage tidal de type amalgamé.....	233
<b>Figure IV-13.</b> Corrélation des différentes unités lithostratigraphiques à partir d'une sélection de carottes datées au $^{14}\text{C}$ .....	236
<b>Figure IV-14.</b> Evolution du taux de carbonates selon les unités traversées (carottes VK12 et VK 13 de la mission VASTEDEBA III).....	238
<b>Figure IV-15.</b> Evolution du taux de carbonates selon les unités traversées dans les sédiments de plusieurs carottes (VK01, VK06, VK08, VK17).....	239
<b>Figure IV-16.</b> Evolution du taux de carbone organique et de la moyenne granulométrique dans la carotte 2678.....	240
<b>Figure IV-17.</b> Relation entre le pourcentage de carbone organique et la fraction fine totale du sédiment dans les carottes de la Baie de Seine sud-orientale: argiles reliques intertidales (Franceville) et subtidales (2678), sédiments actuels (crème de vase et sables envasés).....	240
<b>Figure IV-18.</b> Minéralogie des argiles de la carotte 2188.....	242
<b>Figure IV-19.</b> Données palynologiques obtenues sur la carotte 2188.....	246
<b>Figure IV-20.</b> Données palynologiques obtenues sur la carotte VK12.....	247
<b>Figure IV-21.</b> Photos aériennes de la plage de Franceville-Merville et localisation des affleurements de sédiments reliques rencontrés sur la plage.....	249
<b>Figure IV-22.</b> Affleurement d'argiles reliques sur la plage de Franceville-Merville.....	248
<b>Figure IV-23.</b> Log lithostratigraphique de synthèse des dépôts reliques retrouvés sur la plage de Franceville-Merville.....	250
<b>Figure IV-24.</b> Radiographies de 2 clichés positifs (sables en sombre, argiles en clair) de carottes prélevées sur la plage de Franceville-Merville (système Scopix, Université de Bordeaux I).....	250
<b>Figure IV-25.</b> Données palynologiques obtenues dans une carotte prélevée sur la plage de Franceville-Merville.....	251

## **Chapitre V**

<b>Figure V-1.</b> Portions de 2 carottes (1120 et VK13) illustrant les faciès et les structures sédimentaires des trois unités lithostratigraphiques de la séquence de remplissage holocène de la Baie de Seine sud-orientale (Garnaud et al., soumis).....	261
<b>Figure V-2.</b> Reconstitution d'une séquence sédimentaire type du comblement holocène de la Baie de Seine sud-orientale réalisée à partir de toutes les données collectées depuis 1999 sur la zone d'étude:	

carottages Küllenberg, vibrocarottages, descriptions lithologiques (photographies et radiographies au RX), analyses granulométriques, chronologie établie grâce à la palynologie et aux datations <sup>14</sup> C (Garnaud et al., soumis).....	262
<b>Figure V-3.</b> Carte de répartition des sédiments superficiels illustrant les variations spatio-temporelles de la fraction fine (< 50 µm) en Baie de Seine sud-orientale: (a) détail de la carte original des sédiments superficiels de la Manche (Larsonneur & Hommeril, 1967; Vaslet et al., 1978), (b) situation en août-septembre 1977 (Avoine, 1986), (c) situation de 2000 (Garnaud et al., soumis) .....	265
<b>Figure V-4.</b> Evolution des surfaces relatives à la teneur en fraction fine dans les sédiments superficiels en 1967, 1977 et 2000. La zone de l'embouchure de la Seine couverte en 1977 n'a pas été prise en compte dans ce calcul (Garnaud et al., soumis).....	265
<b>Figure V-5. a/</b> Sonogrammes révélant les formes sédimentaires présentes dans les fonds (< 6 m) en Baie de Seine sud-orientale. Les argiles holocènes (écho sombre) qui affleurent sont creusées par des sillons coquilliers ornés de mégarides. <b>b/</b> Zone d'affleurement des argiles reliques entre Cabourg et Villers-sur-mer d'après l'interprétation des levés de sonar à balayage latéral (argiles affleurantes) et de l'ensemble des bennes et des carottages effectués (argiles subaffleurantes) .....	266
<b>Figure V-6.</b> Représentation schématique des principaux mécanismes sédimentaires (a) entre 1967 et 2000, (b) évolution actuelle des fonds de la Baie de Seine sud-orientale à une profondeur d'eau de 3-8 m et comportement des dépôts issus des crues estuariennes (Garnaud et al., soumis) .....	268
<b>Figure V-7. a/</b> Synthèse des résultats obtenus sur l'évolution de la fraction fine dans les sédiments superficiels de la Baie de Seine sud-orientale depuis 1834 à différentes échelles de temps et projection dans l'avenir: période 1834-1913 - cartes du SHOM (●); 1967-1982 - cartes de l'université de Caen (●); 1998-2001, cette étude (●). <b>b/</b> Evolution à moyen-terme de la fraction fine entre Cabourg et Deauville pour la période 1995-2000, <b>c/</b> Evolution à court-terme (1998-2001) de la fraction fine sur la radiale atelier FL22-FL37.....	271

## Annexes

<b>Figure A1-1.</b> Illustration des différents outils scientifiques utilisés dans ce travail en Baie de Seine sud-orientale et profondeur d'investigation des quatre carottiers utilisés lors des campagnes en mer.....	A-5
<b>Figure A2-1.</b> Schéma de mise en œuvre et de fonctionnement du sonar à balayage latéral ( <a href="http://pubs.usgs.gov">http://pubs.usgs.gov</a> ) ...	A-43
<b>Figure A3-1.</b> Evolution des distributions granulométriques d'un sédiment source érodé, transporté puis déposé.....	A-49
<b>Figure A3-2.</b> Distributions granulométriques du sédiments source et courbes de fonction de transfert résultantes sous différents régimes hydrauliques .....	A-50
<b>Figure A3-3.</b> Schéma explicatif de la procédure de traitement bidimensionnel des paramètres granulométriques par la méthode de Gao et Collins (Gao & Collins, 1991, 1992).....	A-52
<b>Figure A3-4.</b> Semi-variogrammes des paramètres granulométriques.....	A-54
<b>Figure A3-5.</b> Principe de l'interpolation des paramètres granulométriques (step II) dans le cas d'un échantillonnage irrégulier (step I) pour la constitution de grilles homogènes avant de calculer les directions de transport résiduel (step III) (Asselman, 1999) .....	A-55
<b>Figure A4-1.</b> Situation des points de prélèvements sédimentaires effectués au nord de l'Eel river après l'épisode de crue de mars 1999 (Alexander <i>et al.</i> , 2000). .....	A-48
<b>Figure A4-2.</b> Carte des isopaques des sédiments déposés après la crue de l'Eel river en janvier 1995. Bathymétrie de la zone d'étude en mètres (Wheatcroft 2000).....	A-49
<b>Figure A5-1.</b> Troncs renversés et tourbe fossile présente sous la plage de Luc-sur-Mer à environ 150 m du haut de plage dans l'alignement de l'ancien ruisseau .....	A-57

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre I

<b>Tableau I-1.</b> Classement des principaux fleuves du monde par ordre décroissant de la charge solide fournie (d'après Milliman 1990 et modifié par Wright & Nittrouer, 1995).....	17
<b>Tableau I-2.</b> Budget sédimentaire mondial des apports en particules fines sur les plates-formes continentales actuelles .....	18

<b>Tableau I-3.</b> Exemples mondiaux de dépôts de sédiments fins sur les différentes parties de la plate-forme continentale.....	20
<b>Tableau I-4.</b> Chronologie de la période postglaciaire .....	30
<b>Tableau I-5.</b> Limite de l'intrusion saline selon les conditions de marée et de débit fluviaux (d'après Avoine, 1981). Extension du panache d'eau dessalé (d'après Aminot et al., 1997).....	39

## **Chapitre II**

<b>Tableau II-1.</b> Evolution de la distribution des sédiments fins (< 50 µm) en Baie de Seine orientale entre 1967 et 2000 (Garnaud et al., soumis).....	75
--	----

## **Chapitre III**

<b>Tableau III-1.</b> Synthèse de quelques travaux décrivant des sillons érosifs dans différents domaines de plate-forme mondiale et intégration de nos travaux .....	104
<b>Tableau III-2.</b> Evolution de la distribution des sédiments fins (< 50 µm) en Baie de Seine orientale entre septembre 1981 et septembre 1982 (calcul des aires établis à partir des cartes d'Avoine, 1994).....	124
<b>Tableau III-3.</b> Récapitulatif des situations saisonnières observées en Baie de Seine sud-orientale le long de la radiale FLUXMANCHE FL22-FL37 entre septembre 1998 et juin 2001 et calcul de l'envasement moyen des sédiments superficiels.....	129
<b>Tableau III-4.</b> Bilan des différents sens de transport sédimentaire observés en février et juin 2001 selon les résultats obtenus pour les trois cas choisis par la méthode de Gao et Collins.....	157
<b>Tableau III-5.</b> Bilan quantitatif des échanges annuels dans l'estuaire de la Seine (d'après Avoine, 1986a; Guézennec et al., 1999; Guézennec, 1999; Lesourd, 2000; Dupont et al., 2001).....	160
<b>Tableau III-6.</b> Bilan et volume des matériaux dragués depuis 1983 à Ouistreham et Deauville (Avoine, 1994; Alzieu, 1999).....	165
<b>Tableau III-7.</b> Composition des cortèges argileux dans les différentes zones en Figure III-61, d'après les données issues d'Avoine (1981) et de Dubrulle (1982).....	169
<b>Tableau III-8.</b> Référence des travaux antérieurs réalisés sur le cortège argileux des sédiments superficiels et MES prélevés entre 1969 et 2000.....	170
<b>Tableau III-9.</b> Composition moyenne des cortèges argileux des sédiments présents dans les fonds subtidiaux de la Baie de Seine sud-orientale .....	171
<b>Tableau III-10.</b> Evolution des paramètres hydrosédimentaires en Baie de Seine orientale au cours des points fixes au large de Villers-sur-Mer (49°21,68'N et 00°01,98'W).....	194

## **Chapitre IV**

<b>Tableau IV-1.</b> Localisation des points de vibrocarottage réalisés pendant la campagne VASTEDEBA III et longueur des carottes effectuées.....	224
<b>Tableau IV-2.</b> Données radiochronologiques obtenues sur les carottes de la Baie de Seine sud-orientale.....	235

## **Annexes**

<b>Tableau A1-1.</b> Programmes scientifiques de rattachement des différentes missions effectués depuis 1995 .....	A-1
<b>Tableau A1-2.</b> Récapitulatif, description (période, débits) et contenu (échantillonnage) des missions réalisées en Baie de Seine orientale entre 1995 et 1999 .....	A-2
<b>Tableau A1-3.</b> Récapitulatif, description (période, débits) et contenu (échantillonnage) des missions réalisées en Baie de Seine orientale entre 2000 et 2002 .....	A-3
<b>Tableau A1-4.</b> Bilan des travaux (échantillonnage, imagerie, mesures) réalisés en Baie de Seine orientale avant et pendant les missions VASTEDEBA .....	A-4
<b>Tableau A4-1.</b> Caractéristiques des débits de l'Eel river et des dépôts vaseux sur la plate-forme adjacente pour des événements de crue récents.....	A-62

# Annexes

---

<b>Annexes 1: Catalogue des données sédimentologiques acquises lors des missions VASTEDEBA.....</b>	<b>A-1</b>
Déroulement des missions et contexte hydrologique .....	A-1
VASTEDEBA 1 .....	A-6
VASTEDEBA 2 .....	A-17
VASTEDEBA 3 .....	A-25
VASTEDEBA 4 .....	A-33
<b>Annexe 2: Sonar à balayage latéral et calcul des paramètres granulométriques .....</b>	<b>A-41</b>
Sonar à balayage latéral.....	A-42
Calcul des paramètres granulométriques.....	A-44
<b>Annexe 3: Fondements et principe de la méthode de Gao et Collins.....</b>	<b>A-47</b>
Approche intuitive de Mc Laren (1981) et amélioration de la méthode par Mc Laren et Bowles (1985) ..	A-48
Approche de Gao et Collins (1991; 1992; Gao <i>et al.</i> , 1994).....	A-50
Distance critique.....	A-53
Grille d'échantillonnage.....	A-54
Echelles de temps .....	A-55
Conclusion sur la méthode .....	A-55
<b>Annexe 4: Oceanic flood, Eel river – STRATAFORM .....</b>	<b>A-59</b>
Introduction .....	A-60
Caractéristiques des dépôts de crue de janvier 1995 et janvier 1997 .....	A-61
Perspectives .....	A-62
<b>Annexe 5: Complément d'information au chapitre IV: dépôts holocènes de Saint-Côme de     Fresné – Asnelles et de l'ancien ruisseau de Luc-sur-mer.....</b>	<b>A-65</b>
Les formations tourbeuses sur la côte du Calvados.....	A-66
Saint-Côme de Fresné – Asnelles.....	A-66
L'ancien ruisseau de Luc-sur-mer.....	A-67
<b>Annexe 6: Caractérisation des variations lithologiques saisonnières des sédiments de la Baie de     Seine sud-orientale; impact des crues de la Seine (France).....</b>	<b>A-71</b>

## **ANNEXE 1**

---

# **CATALOGUE DES DONNEES SEDIMENTOLOGIQUES ACQUISES LORS DES MISSIONS VASTEDEBA (2000 & 2001)**

**Cartes des prélèvements sédimentaires par benne Shipeck,  
carottier Reineck, Küllenberg et vibrocarottier et de  
positionnement des levés de sonar à balayage latéral**

**Répartition des fractions fines au cours  
des 4 campagnes VASTEDEBA**

**Tableaux récapitulatifs des coordonnées géographiques des  
points de prélèvements (bennes et carottages)**

## Déroulement des missions et contexte hydrologique

Ce travail s'appuie sur un ensemble de nouvelles données sédimentologiques, acoustiques et hydrologiques acquises sur le site d'étude de la Baie de Seine orientale dont le détail est donné en tableaux A1-1, A1-2 et A1-3. Les missions antérieures de prélèvements (FLUXMANCHE et BENTHOSEINE, 1995-1999), dont les échantillons et les résultats sont exploités au cours de ce travail, sont également présentées (*tabl. A1-2*). Ils ont servi de point de départ à l'étude comparative des envasements aux échelles de temps saisonnières. Les missions réalisées depuis 2000 sous le sigle VASTEDEBA (VASière TEMPoraire DE la BAie de Seine) ont toutes été préparées et organisées au cours de mon doctorat (*tabl. A1-1 et A1-3*). Au cours de cette thèse, les campagnes en mer se sont déroulées dans des conditions hydrologiques particulières avec de très longues périodes de débits soutenus et des débits instantanés dépassant fréquemment les  $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Un débit instantané de  $2280 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a même été atteint le 27 mars 2001; il correspond au plus fort débit jamais enregistré depuis le suivi journalier des débits initié en 1941. A l'exception des prélèvements réalisés lors de missions FLUXMANCHE, j'ai effectué l'ensemble des analyses des échantillons précisés dans le tableau A1-4.

Missions	Période de l'année	Programmes de recherche rattachés
FLUXMANCHE	Janvier 1995	FLUXMANCHE
FLUXMANCHE	Février 1995	FLUXMANCHE
BENTHOSEINE	Septembre 1998	PNEC BAIE DE SEINE
BENTHOSEINE	Mars 1999	PNEC BAIE DE SEINE
BENTHOSEINE	Mai 1999	PNEC BAIE DE SEINE
VASTEDEBA I	Février 2000	PNEC BAIE DE SEINE
VASTEDEBA II	Juin 2000	PNEC BAIE DE SEINE
VASTEDEBA IV	Mai 2001	SEINE-AVAL II
VASTEDEBA III	Juin 2001	SEINE-AVAL II
SEAVINT	Mars 2002	SEINE-AVAL II

**Tableau A1-1.** Programmes scientifiques de rattachement des différentes missions effectuées depuis 1995 en Baie de Seine sud-orientale.

Nom de la mission et chef de mission	Périodes	Débits ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) à Poses		Contenu scientifique de la mission	Prélèvements sédimentaires
		Pendant la mission moy. / maxi	Sur le mois précédent la mission moy. / maxi		
<b>FLUXMANCHE</b> J. Avoine	18 janvier 1995	1051 / 1051	688 / 1170	1. Prélèvements à la benne Shipeck le long de la radiale FLUXMANCHE	44 Shipeck
<b>FLUXMANCHE</b> J. Avoine	07-09-13 et 20 février 1995	1637 / 2060	1391 / 2153	1. Prélèvements à la benne Shipeck le long de la radiale FLUXMANCHE	44 Shipeck
<b>BENTHOSEINE 98</b> P. Lesueur	23 au 25 septembre 1998	223 / 229	222 / 294	1. Prélèvements à la benne Shipeck et au carottier Reineck 2. Vidéo sous-marine 3. Une station hydrosédimentaire de mouillage pour des mesures en point fixe pendant un cycle de 13 h	31 Shipeck 11 Reineck
<b>BENTHOSEINE 99</b> P. Lesueur	11 et 12 mars 1999	1522 / 1522	1237 / 1538	1. Prélèvements à la benne Shipeck et au carottier Reineck 2. Vidéo sous-marine 3. Une station hydrosédimentaire de mouillage pour des mesures en point fixe	43 Shipeck 7 Reineck
<b>BENTHOSEINE 99</b> P. Lesueur	15 et 20 mai 1999	450 / 466	723 / 1146	1. Prélèvements à la benne Shipeck, au carottier Reineck et Küllenberg 2. Vidéo sous-marine 3. Une station hydrosédimentaire de mouillage pour des mesures en point fixe pendant un cycle de 13 h	46 Shipeck 6 Reineck 5 Küllenberg

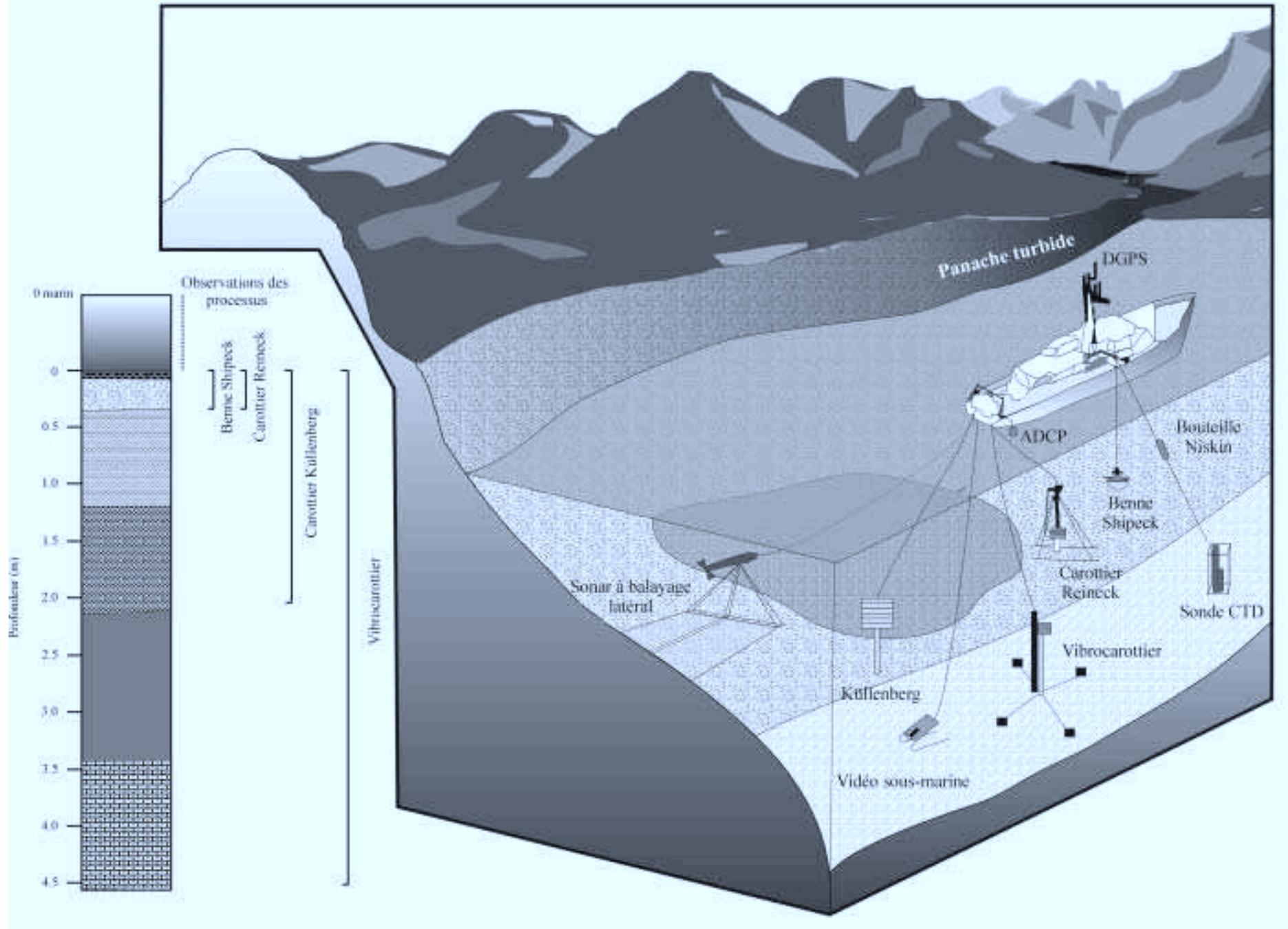
**Tableau A1-2.** Récapitulatif, description (période, débits) et contenu (échantillonnage) des missions réalisées en Baie de Seine orientale entre 1995 et 1999.

Nom de la mission et chefs de mission	Périodes et bateaux	Débits ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) à Poses		Contenu scientifique de la mission	Prélèvements sédimentaires
		Pendant la mission moy. / maxi	Sur le mois précédent la mission moy. / maxi		
<b>VASTEDEBA I</b> S. Garnaud P. Lesueur	21 février au 05 mars 2000  Côtes de la Manche	1354 / 1528	946 / 1515	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prélèvements à la benne Shipeck et au carottier Reineck</li> <li>2. Vidéo sous-marine</li> <li>3. Deux stations hydrosédimentaires de mouillage pour des mesures en point fixe pendant un cycle de 13 h</li> </ol>	420 Shipeck 35 Reineck
<b>VASTEDEBA II</b> S. Garnaud P. Lesueur	11 au 21 juin 2000  Côtes de la Manche	418 / 568	492 / 733	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prélèvements à la benne Shipeck, au carottier Reineck et Küllenberg</li> <li>2. Levés de sonar à balayage latéral</li> </ol>	115 Shipeck 12 Reineck 10 Küllenberg
<b>VASTEDEBA IV</b> S. Garnaud P. Lesueur P. Bassoulet	02 mai au 13 mai 2001  Côtes de la Manche	1612 / 1734	1657 / 2148	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prélèvements à la benne Shipeck et au carottier Reineck</li> <li>2. Mise en œuvre d'un vibrocarottier</li> </ol>	173 Shipeck 19 Reineck 24 vibrocarottier
<b>VASTEDEBA III</b> S. Garnaud P. Lesueur	08 au 22 juin 2001  Thalia	504 / 600	1036 / 1700	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prélèvements à la benne Shipeck et au carottier Reineck</li> <li>2. Levés de sonar à balayage latéral</li> <li>3. Vidéo sous-marine</li> </ol>	131 Shipeck 12 Reineck
<b>SEAVINT</b> R. Lafitte P. Lesueur S. Garnaud	18 au 20 mars 2002  Côtes de la Manche	982 / 1111	1437 / 1796	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prélèvements à la benne Shipeck et au carottier Reineck</li> </ol>	34 Shipeck 4 Reineck

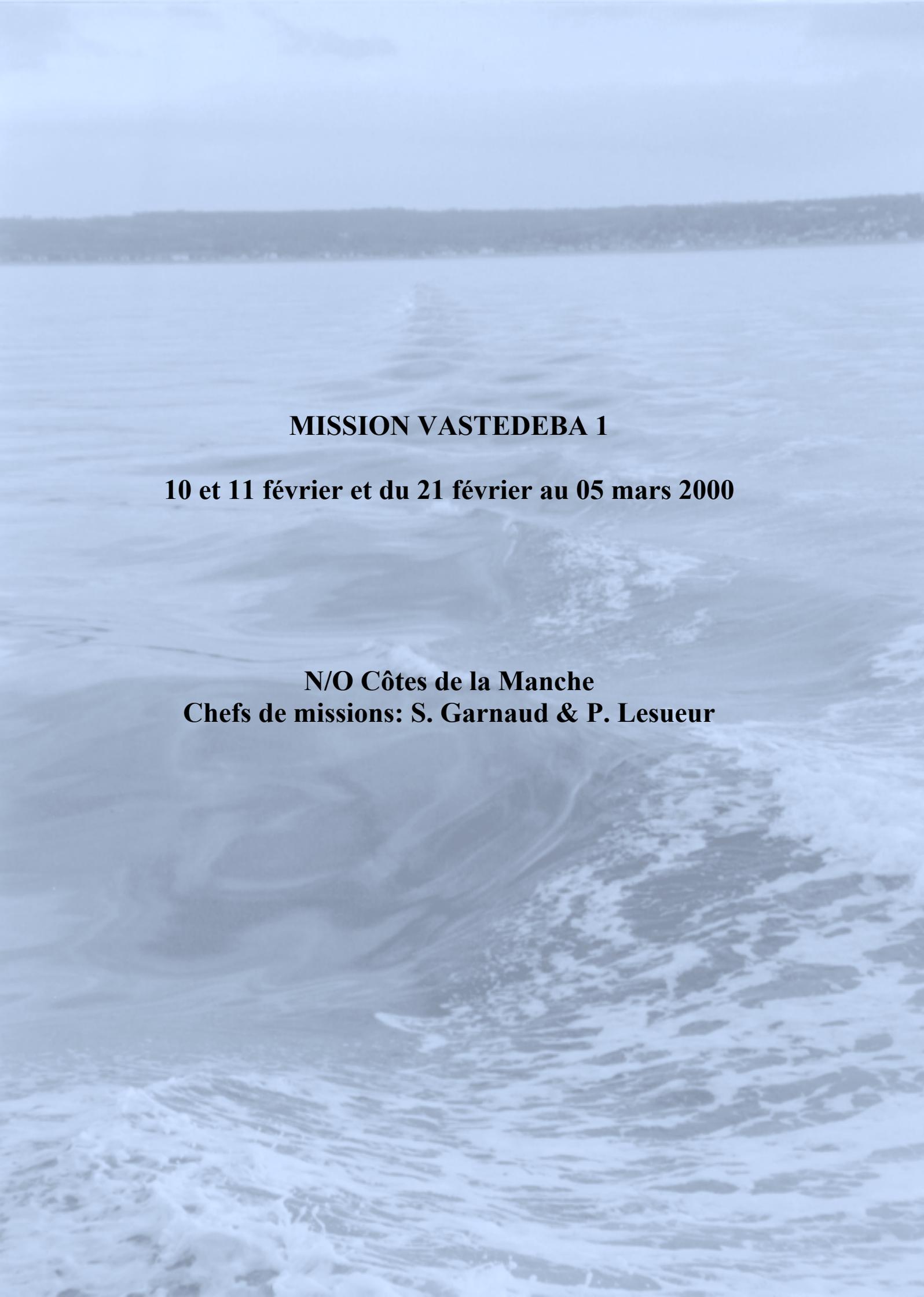
**Tableau A1-3.** Récapitulatif, description (période, débits) et contenu (échantillonnage) des missions réalisées en Baie de Seine orientale entre 2000 et 2002.

Outils scientifiques utilisés (fig. A1-1)	Nombre		
	BENTHOSEINE (1998-1999)	VASTEDEBA (2000-2001)	Total
Benne Shipeck	208	873	1081
Carottier Reineck	24	82	106
Carottier Küllenberg	5	10	15
Vibrocarottier	/	24	24
Profils de sonar à balayage latéral	/	250 km	250 km
Vidéo sous-marine	3 sites	6 sites	9 sites
Mesures en points fixes: - profils de sonde CTD - courantométrie - mesures microgranulométrique	3 sites + de 150 39 heures ~ 250	2 sites + de 100 26 heures ~ 300	5 sites + de 250 65 heures + de 500

**Tableau A1-4.** Bilan des travaux (échantillonnage, imagerie, mesures) réalisés en Baie de Seine orientale avant et pendant les missions VASTEDEBA.



**Figure A1-1.** Illustration des différents outils scientifiques utilisés dans ce travail en Baie de Seine sud-orientale et profondeur d'investigation des quatre carottiers utilisés lors des campagnes en mer. Relief en arrière plan fictif.

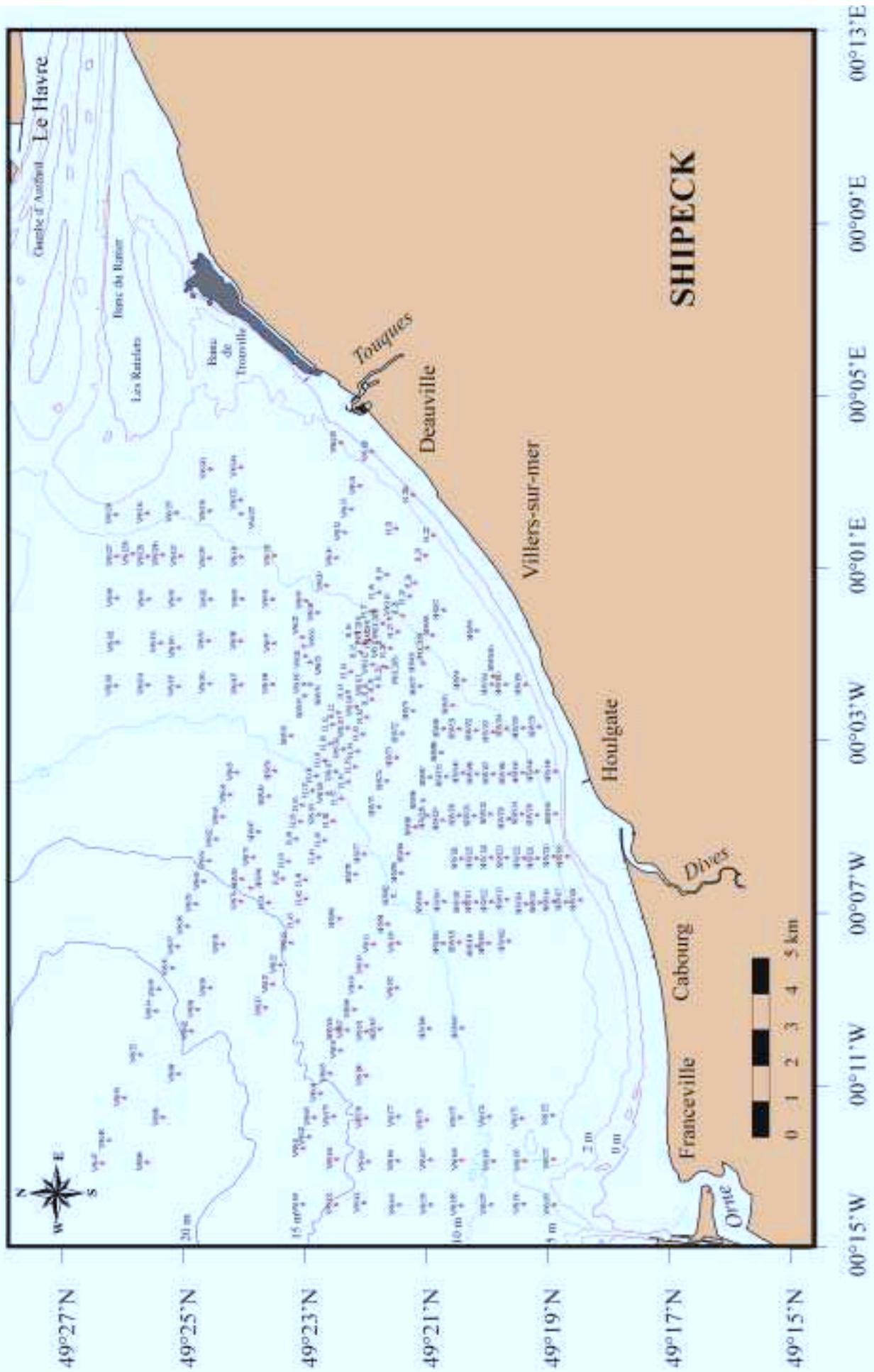


**MISSION VASTEDEBA 1**

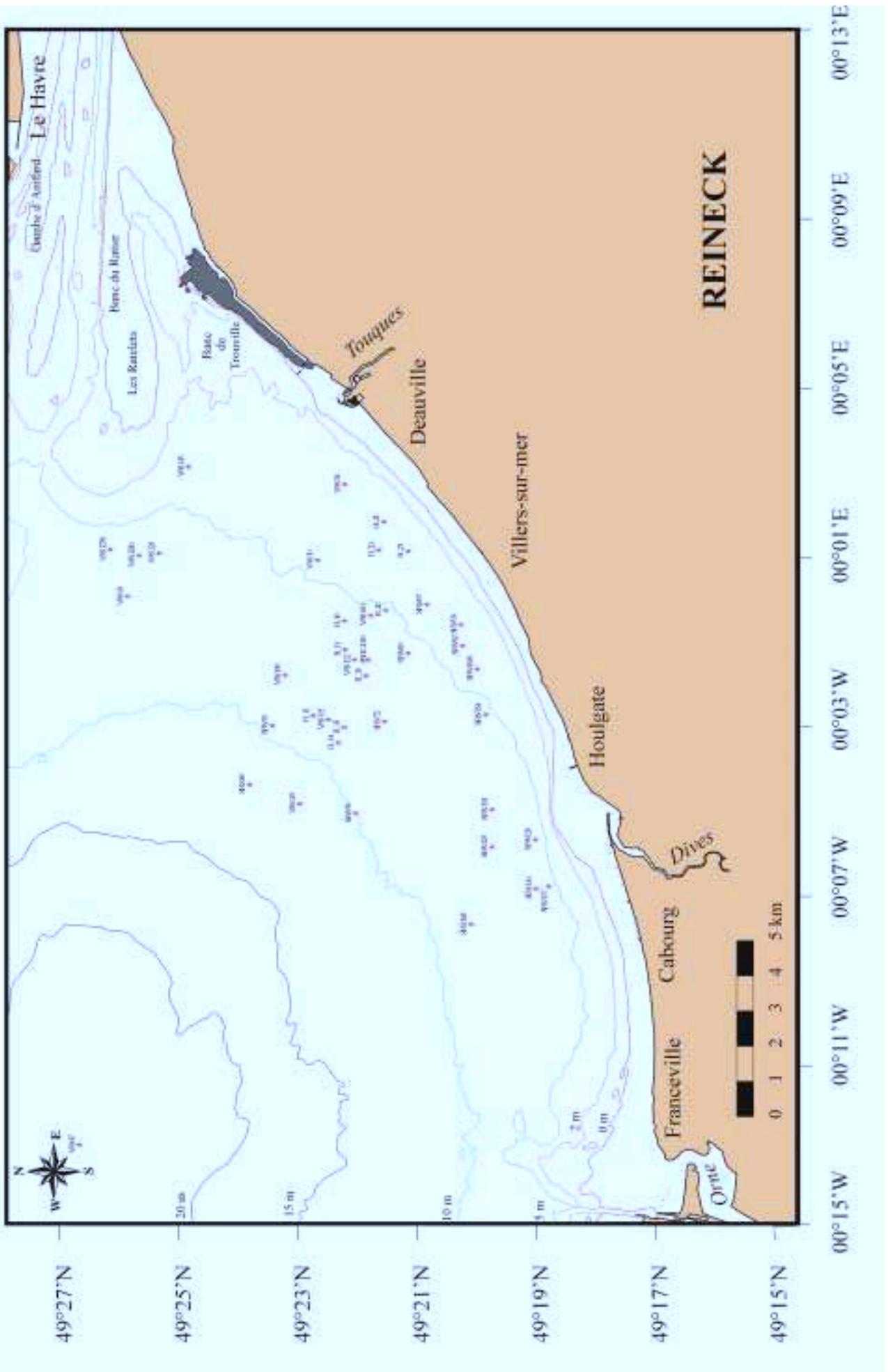
**10 et 11 février et du 21 février au 05 mars 2000**

**N/O Côtes de la Manche  
Chefs de missions: S. Garnaud & P. Lesueur**

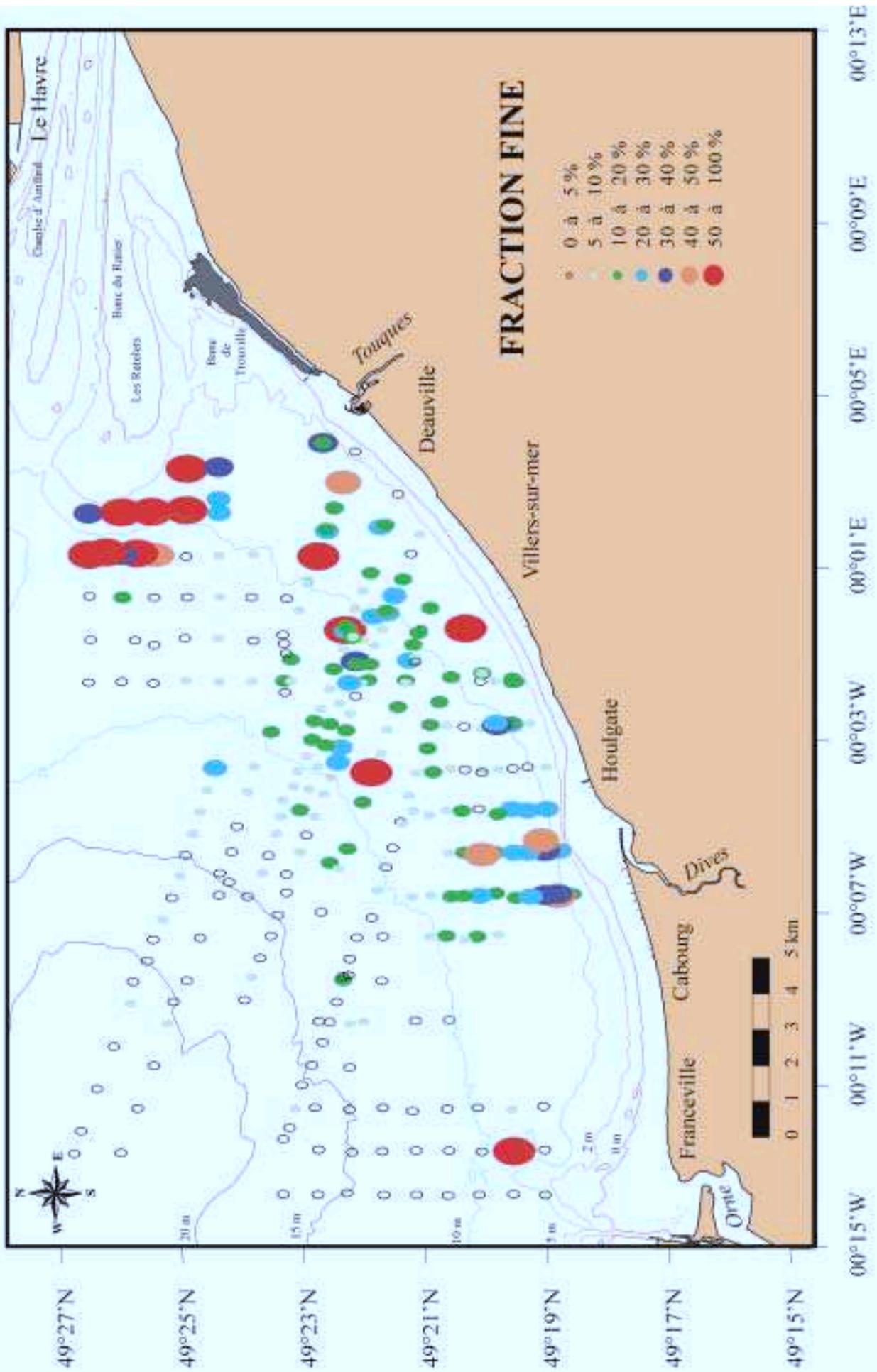
Mission VASTEDEBA I - N/O COTES DE LA MANCHE - MARS 2000



Mission VASTEDEBA I - N/O COTES DE LA MANCHE - MARS 2000



**Mission VASTEDEBA I - N/O COTES DE LA MANCHE - MARS 2000**



**Campagne VASTEDEBA I: 10 et 11 février 2000 et du 21 février au 05 mars 2000 - Côtes de la Manche, benne Shipeck**

A-11

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2223	VAS 01	49° 23,02 N	00° 12,71 W
2224	VAS 02	49° 22,92 N	00° 12,44 W
2225	VAS 03	49° 22,83 N	00° 11,99 W
2226	VAS 04	49° 22,73 N	00° 11,44 W
2227	VAS 05	49° 22,58 N	00° 10,98 W
2228	VAS 06	49° 22,41 N	00° 10,44 W
2229	VAS 07	49° 22,31 N	00° 09,97 W
2230	VAS 08	49° 22,20 N	00° 09,50 W
2231	VAS 09	49° 22,10 N	00° 08,98 W
2232	VAS 09	49° 22,10 N	00° 08,89 W
2233	VAS 09	49° 22,02 N	00° 08,87 W
2234	VAS 10	49° 22,00 N	00° 08,49 W
2235	VAS 11	49° 21,89 N	00° 07,99 W
2236	SEW 81	49° 21,66 N	00° 07,53 W
2237	SEW 82	49° 21,58 N	00° 06,88 W
2238	SEW 83	49° 21,45 N	00° 06,34 W
2239	SEW 84	49° 21,34 N	00° 05,89 W
2240	SEW 85	49° 21,22 N	00° 05,28 W
2241	SEW 80	49° 22,44 N	00° 07,39 W
2242	SEW 78	49° 22,31 N	00° 06,24 W
2243	SEW 78	49° 22,17 N	00° 06,38 W
2244	SEW 77	49° 22,03 N	00° 05,91 W
2245	SEW 85	49° 21,20 N	00° 05,33 W
2247	SEW 75	49° 21,80 N	00° 04,82 W
2248	SEW 74	49° 21,68 N	00° 04,22 W
2249	SEW 74	49° 21,67 N	00° 04,12 W
2250	SEW 73	49° 21,52 N	00° 03,68 W
2251	SEW 72	49° 21,43 N	00° 03,12 W
2253	SEW 71	49° 21,26 N	00° 02,59 W
2254	SEW 70	49° 21,14 N	00° 01,97 W
2255	SEW 69	49° 21,09 N	00° 01,50 W
2256	SEW 69	49° 21,00 N	00° 01,43 W
2258	SEW 68	49° 20,91 N	00° 00,77 W
2259	SEW 67	49° 20,77 N	00° 00,27 W
2261	SEW 93	49° 20,24 N	00° 00,74 W
2262	SEW 93	49° 20,23 N	00° 00,75 W
2265	SEW 91	49° 20,45 N	00° 01,89 W
2266	SEW 90	49° 20,63 N	00° 02,47 W
2267	SEW 89	49° 20,77 N	00° 03,01 W
2268	SEW 88	49° 20,81 N	00° 03,56 W
2269	SEW 88	49° 20,81 N	00° 03,56 W

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2270	SEW 87	49° 20,99 N	00° 04,13 W
2271	SEW 86	49° 21,10 N	00° 04,67 W
2272	FL 25	49° 21,31 N	00° 00,05 E
2273	FL 26	49° 21,42 N	00° 00,40 W
2275	FL 16	49° 22,07 N	00° 00,79 W
2276	FL 16	49° 22,06 N	00° 00,81 W
2279	FL 30	49° 21,72 N	00° 01,96 W
2281	FL 30	49° 21,82 N	00° 02,03 W
2282	FL 31	49° 21,91 N	00° 02,34 W
2283	FL 32	49° 21,99 N	00° 02,75 W
2284	FL 33	49° 22,05 N	00° 03,14 W
2286	FL 34	49° 22,14 N	00° 03,53 W
2288	FL 35	49° 22,18 N	00° 03,89 W
2289	FL 36	49° 22,29 N	00° 04,24 W
2290	FL 37	49° 22,40 N	00° 04,62 W
2291	FL 38	49° 22,53 N	00° 05,15 W
2292	FL 39	49° 22,66 N	00° 05,59 W
2293	FL 40	49° 22,76 N	00° 05,98 W
2294	FL 41	49° 22,97 N	00° 06,51 W
2295	FL 42	49° 22,97 N	00° 06,94 W
2296	FL 43	49° 23,10 N	00° 07,47 W
2297	VAS 23	49° 23,20 N	00° 07,96 W
2298	VAS 22	49° 23,37 N	00° 08,47 W
2299	VAS 21	49° 23,50 N	00° 08,92 W
2300	VAS 20	49° 23,61 N	00° 09,45 W
2301	SEW 166	49° 22,47 N	00° 09,95 W
2302	SEW 167	49° 21,78 N	00° 09,95 W
2303	SEW 168	49° 21,00 N	00° 09,94 W
2304	SEW 169	49° 20,48 N	00° 09,93 W
2305	SEW 102	49° 19,73 N	00° 07,92 W
2306	SEW 103	49° 20,05 N	00° 07,97 W
2308	SEW 104	49° 20,24 N	00° 08,03 W
2309	SEW 105	49° 20,52 N	00° 07,95 W
2310	SEW 106	49° 20,78 N	00° 07,97 W
2311	SEW 118	49° 18,59 N	00° 06,97 W
2312	SEW 117	49° 18,82 N	00° 07,02 W
2313	SEW 116	49° 19,02 N	00° 07,00 W
2314	SEW 119	49° 18,80 N	00° 05,96 W
2315	SEW 120	49° 19,02 N	00° 05,96 W
2316	SEW 121	49° 19,28 N	00° 06,00 W
2317	SEW 136	49° 18,99 N	00° 04,98 W

Campagne VASTEDEBA I: 10 et 11 février 2000 et du 21 février au 05 mars 2000 - Côtes de la Manche, benne Shipneck

A-12

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2318	SEW 135	49° 19,28 N	00° 05,01 W
2319	SEW 134	49° 19,52 N	00° 04,98 W
2320	SEW 143	49° 19,00 N	00° 04,00 W
2321	SEW 144	49° 19,28 N	00° 03,99 W
2322	SEW 145	49° 19,51 N	00° 04,03 W
2323	SEW 156	49° 19,25 N	00° 02,96 W
2324	SEW 155	49° 19,53 N	00° 02,99 W
2325	SEW 154	49° 19,76 N	00° 03,01 W
2326	SEW 159	49° 19,47 N	00° 01,99 W
2327	SEW 160	49° 19,78 N	00° 01,99 W
2328	SEW 161	49° 20,00 N	00° 01,99 W
2329	SEW 153	49° 19,98 N	00° 03,08 W
2330	SEW 152	49° 20,25 N	00° 03,05 W
2331	SEW 151	49° 20,52 N	00° 03,01 W
2332	SEW 150	49° 20,73 N	00° 04,11 W
2333	SEW 149	49° 20,46 N	00° 04,03 W
2334	SEW 148	49° 20,24 N	00° 04,06 W
2335	SEW 147	49° 19,98 N	00° 04,05 W
2336	SEW 147	49° 19,98 N	00° 04,13 W
2337	SEW 146	49° 19,72 N	00° 04,05 W
2338	SEW 133	49° 19,74 N	00° 05,10 W
2340	SEW 132	49° 20,03 N	00° 04,98 W
2341	SEW 131	49° 20,28 N	00° 05,02 W
2342	SEW 130	49° 20,52 N	00° 05,01 W
2343	SEW 129	49° 20,78 N	00° 05,12 W
2344	SEW 128	49° 21,03 N	00° 05,02 W
2346	SEW 126	49° 20,48 N	00° 06,01 W
2347	SEW 125	49° 20,25 N	00° 06,00 W
2348	SEW 124	49° 20,01 N	00° 05,99 W
2349	SEW 123	49° 19,76 N	00° 05,99 W
2351	SEW 122	49° 19,49 N	00° 06,00 W
2352	SEW 114	49° 19,46 N	00° 07,06 W
2353	SEW 115	49° 19,24 N	00° 07,03 W
2354	SEW 113	49° 19,76 N	00° 06,95 W
2355	SEW 112	49° 20,01 N	00° 07,01 W
2356	SEW 111	49° 20,26 N	00° 07,01 W
2357	SEW 110	49° 20,45 N	00° 07,03 W
2358	SEW 109	49° 20,76 N	00° 07,00 W
2359	SEW 108	49° 21,04 N	00° 07,04 W
2360	FL 01	49° 23,56 N	00° 07,03 W
2361	FL 02	49° 23,33 N	00° 06,48 W

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2362	FL 03	49° 23,24 N	00° 06,07 W
2363	FL 04	49° 23,12 N	00° 05,56 W
2364	FL 05	49° 23,06 N	00° 05,15 W
2365	FL 06	49° 23,02 N	00° 04,77 W
2366	FL 07	49° 22,86 N	00° 04,45 W
2367	FL 08	49° 22,80 N	00° 04,10 W
2368	FL 09	49° 22,67 N	00° 03,75 W
2369	FL 10	49° 22,58 N	00° 03,36 W
2370	FL 11	49° 22,54 N	00° 02,92 W
2372	FL 12	49° 22,45 N	00° 02,64 W
2373	FL 13	49° 22,30 N	00° 02,17 W
2374	FL 14	49° 22,25 N	00° 01,70 W
2375	FL 15	49° 22,10 N	00° 01,24 W
2376	FL 16	49° 22,06 N	00° 00,70 W
2378	FL 17	49° 21,93 N	00° 00,30 W
2379	VAS 89	49° 25,98 N	00° 00,01 E
2380	VAS 90	49° 25,47 N	00° 00,02 W
2382	VAS 91	49° 24,99 N	00° 00,03 W
2383	VAS 92	49° 24,49 N	00° 00,02 W
2384	VAS 93	49° 23,98 N	00° 00,01 W
2385	VAS 94	49° 23,50 N	00° 00,02 W
2386	VAS 95	49° 22,97 N	00° 00,05 W
2387	VAS 96	49° 23,00 N	00° 01,11 W
2388	VAS 97	49° 23,47 N	00° 01,04 W
2389	VAS 98	49° 24,01 N	00° 00,99 W
2390	VAS 99	49° 24,52 N	00° 00,98 W
2391	VAS 100	49° 24,99 N	00° 01,14 W
2392	VAS 101	49° 25,28 N	00° 01,03 W
2393	VAS 102	49° 25,96 N	00° 01,02 W
2394	VAS 103	49° 25,99 N	00° 02,02 W
2395	VAS 104	49° 25,49 N	00° 02,00 W
2396	VAS 105	49° 25,00 N	00° 02,03 W
2397	VAS 106	49° 24,50 N	00° 01,97 W
2398	VAS 107	49° 24,00 N	00° 02,00 W
2399	VAS 108	49° 23,50 N	00° 01,98 W
2400	VAS 109	49° 23,00 N	00° 01,98 W
2402	VAS 65	49° 24,06 N	00° 04,02 W
2403	VAS 64	49° 24,18 N	00° 04,53 W
2404	VAS 63	49° 24,29 N	00° 05,05 W
2405	VAS 62	49° 24,40 N	00° 05,56 W
2406	VAS 61	49° 24,51 N	00° 06,06 W

**Campagne VASTEDEBA I: 10 et 11 février 2000 et du 21 février au 05 mars 2000 - Côtes de la Manche, benne Shippeck**

<b>Numéro</b>	<b>Site</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
2407	VAS 60	49° 24,59 N	00° 06,54 W
2408	VAS 59	49° 24,72 N	00° 07,06 W
2409	VAS 58	49° 24,86 N	00° 07,58 W
2410	VAS 57	49° 25,01 N	00° 08,04 W
2411	VAS 56	49° 25,10 N	00° 08,54 W
2412	VAS 55	49° 25,31 N	00° 09,02 W
2413	VAS 54	49° 25,35 N	00° 09,53 W
2414	VAS 52	49° 25,61 N	00° 10,54 W
2415	VAS 50	49° 25,86 N	00° 11,54 W
2416	VAS 48	49° 26,11 N	00° 12,52 W
2417	VAS 47	49° 26,21 N	00° 13,05 W
2419	VAS 88	49° 25,50 N	00° 13,03 W
2420	VAS 86	49° 25,24 N	00° 12,99 W
2421	VAS 84	49° 24,99 N	00° 10,99 W
2422	VAS 82	49° 24,79 N	00° 10,00 W
2423	VAS 81	49° 24,69 N	00° 09,50 W
2424	VAS 80	49° 24,49 N	00° 09,00 W
2425	VAS 78	49° 24,29 N	00° 08,00 W
2426	VAS 76	49° 24,00 N	00° 07,00 W
2427	SEW 44	49° 23,99 N	00° 06,49 W
2428	SEW 46	49° 23,84 N	00° 06,69 W
2429	VAS 75	49° 23,81 N	00° 05,98 W
2430	SEW 47	49° 23,72 N	00° 05,39 W
2431	SEW 49	49° 23,56 N	00° 04,57 W
2433	SEW 50	49° 23,46 N	00° 03,98 W
2434	SEW 53	49° 23,20 N	00° 03,17 W
2437	SEW 55	49° 22,99 N	00° 02,25 W
2438	SEW 56	49° 22,90 N	00° 01,99 W
2439	VAS 72	49° 22,90 N	00° 01,48 W
2440	VAS 72	49° 22,90 N	00° 01,48 W
2441	VAS 26	49° 22,98 N	00° 01,34 W
2442	VAS 25	49° 23,02 N	00° 00,90 W
2443	VAS 24	49° 22,78 N	00° 00,33 W
2444	VAS 29	49° 22,64 N	00° 00,30 E
2445	VAS 29	49° 22,63 N	00° 00,38 E
2446	VAS 30	49° 22,48 N	00° 00,94 E
2448	VAS 32	49° 22,35 N	00° 01,53 E
2449	VAS 33	49° 22,24 N	00° 02,06 E
2450	VAS 34	49° 22,11 N	00° 02,60 E
2451	FL 21	49° 21,53 N	00° 01,62 E
2453	FL 19	49° 21,68 N	00° 00,55 E

<b>Numéro</b>	<b>Site</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
2454	FL 18	49° 21,80 N	00° 00,14 E
2455	FL 29	49° 21,73 N	00° 01,58 W
2456	FL 28	49° 21,62 N	00° 01,15 W
2457	FL 27	49° 21,50 N	00° 00,77 W
2458	FL 26	49° 21,42 N	00° 00,34 W
2459	FL 25	49° 21,32 N	00° 00,02 E
2460	FL 25	49° 21,32 N	00° 00,01 E
2461	FL 24	49° 21,23 N	00° 00,36 E
2462	SEW 68	49° 20,95 N	00° 00,85 W
2463	PNOC 2054	49° 21,03 N	00° 01,13 W
2464	SEW 69	49° 21,00 N	00° 01,53 W
2465	SEW 70	49° 21,15 N	00° 02,03 W
2466	PNOC 2098	49° 21,74 N	00° 00,58 W
2467	VAS 110	49° 21,64 N	00° 00,47 W
2469	VAS 111	49° 21,80 N	00° 01,02 W
2470	PNOC 2109	49° 22,01 N	00° 00,76 W
2471	PNOC 2141	49° 21,96 N	00° 00,97 W
2472	VAS 112	49° 21,90 N	00° 01,52 W
2473	VAS 112	49° 21,91 N	00° 01,52 W
2474	VAS 113	49° 22,00 N	00° 02,06 W
2475	VAS 114	49° 22,16 N	00° 02,50 W
2476	VAS 115	49° 22,30 N	00° 02,99 W
2478	VAS 116	49° 22,37 N	00° 03,48 W
2479	VAS 117	49° 22,49 N	00° 04,00 W
2480	VAS 118	49° 22,62 N	00° 04,51 W
2481	VAS 119	49° 22,76 N	00° 05,00 W
2485	VAS 122	49° 24,01 N	00° 02,28 E
2486	VAS 123	49° 22,41 N	00° 03,60 E
2487	VAS 123	49° 22,41 N	00° 03,60 E
2488	VAS 126	49° 21,91 N	00° 03,39 E
2489	FL 21b	49° 21,26 N	00° 02,40 E
2490	FL 22	49° 20,93 N	00° 01,46 E
2491	FL 23	49° 21,06 N	00° 00,99 E
2493	FL 21	49° 21,45 N	00° 01,68 E
2495	VAS 34	49° 22,10 N	00° 02,67 E
2497	VAS 33	49° 22,25 N	00° 02,08 E
2498	VAS 33	49° 22,23 N	00° 02,08 E
2499	VAS 32	49° 22,36 N	00° 01,58 E
2505	VAS 132	49° 23,47 N	00° 00,99 E
2506	VAS 131	49° 24,00 N	00° 00,96 E
2507	VAS 130	49° 24,50 N	00° 00,93 E

Campagne VASTEDEBA I: 10 et 11 février 2000 et du 21 février au 05 mars 2000 - Côtes de la Manche, benne Shipeck

A-14

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2508	VAS 129	49° 24,96 N	00° 00,97 E
2510	VAS 129b	49° 25,25 N	00° 01,01 E
2513	VAS 128	49° 25,48 N	00° 00,97 E
2514	VAS 127	49° 25,98 N	00° 00,98 E
2515	VAS 133	49° 25,99 N	00° 01,94 E
2516	VAS 134	49° 25,49 N	00° 01,97 E
2517	VAS 135	49° 25,03 N	00° 01,99 E
2518	VAS 136	49° 24,50 N	00° 02,02 E
2519	VAS 143	49° 24,49 N	00° 02,99 E
2521	VAS 144	49° 24,01 N	00° 03,03 E
2522	VAS 137	49° 24,00 N	00° 01,96 E
2523	PNOC 2141	49° 21,95 N	00° 00,95 W
2524	FL 26	49° 21,44 N	00° 00,33 W
2526	FL 24	49° 21,19 N	00° 00,41 E
2527	FL 24	49° 21,19 N	00° 00,40 E
2527	SEW 161b	49° 19,98 N	00° 01,80 W
2526	SEW 161b	49° 19,98 N	00° 01,80 W
2529	SEW 159	49° 19,52 N	00° 02,01 W
2530	SEW 159	49° 19,51 N	00° 01,92 W
2531	SEW 155	49° 19,51 N	00° 02,99 W
2532	SEW 155	49° 19,52 N	00° 02,96 W
2533	SEW 154	49° 19,75 N	00° 03,02 W
2534	SEW 154	49° 19,77 N	00° 02,96 W
2537	SEW 124	49° 19,98 N	00° 06,05 W
2539	SEW 120	49° 19,08 N	00° 05,71 W
2540	SEW 117	49° 18,82 N	00° 06,97 W
2543	SEW 116	49° 19,04 N	00° 07,02 W
2546	VAS 155	49° 19,01 N	00° 14,02 W
2547	VAS 156	49° 19,50 N	00° 14,00 W
2548	VAS 157	49° 20,02 N	00° 14,01 W
2549	VAS 158	49° 20,49 N	00° 14,03 W
2550	VAS 159	49° 20,98 N	00° 14,01 W
2551	VAS 160	49° 21,48 N	00° 14,02 W
2552	VAS 161	49° 22,04 N	00° 13,97 W
2553	VAS 162	49° 22,49 N	00° 14,01 W
2554	VAS 163	49° 23,02 N	00° 14,00 W
2555	VAS 164	49° 22,48 N	00° 12,96 W
2556	VAS 165	49° 21,97 N	00° 13,02 W
2557	VAS 166	49° 21,50 N	00° 12,99 W
2558	VAS 167	49° 20,99 N	00° 12,97 W
2559	VAS 168	49° 20,48 N	00° 12,98 W

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2560	VAS 169	49° 19,98 N	00° 13,00 W
2561	VAS 170	49° 19,49 N	00° 13,00 W
2562	VAS 171	49° 19,02 N	00° 12,96 W
2563	VAS 172	49° 19,04 N	00° 11,95 W
2564	VAS 173	49° 19,52 N	00° 12,02 W
2565	VAS 174	49° 20,04 N	00° 11,98 W
2566	VAS 175	49° 20,51 N	00° 12,00 W
2567	VAS 176	49° 21,04 N	00° 12,05 W
2568	VAS 177	49° 21,49 N	00° 11,97 W
2569	VAS 178	49° 22,01 N	00° 12,01 W
2570	VAS 179	49° 22,53 N	00° 11,97 W
2571	VAS 180	49° 22,00 N	00° 11,03 W
2572	VAS 191	49° 22,00 N	00° 10,00 W
2573	VAS 192	49° 21,51 N	00° 09,00 W
2574	VAS 193	49° 21,49 N	00° 07,96 W
2575	VAS 121	49° 27,92 N	00° 01,30 E
2576	VAS 127b	49° 25,72 N	00° 01,03 E
2578	VAS 112	49° 21,90 N	00° 01,58 W
2579	VAS 113	49° 22,01 N	00° 02,03 W
2580	PNOC 2056	49° 21,68 N	00° 01,59 W

**Campagne VASTEDEBA I: 10 et 11 février 2000 et du 21 février au  
05 mars 2000 - Côtes de la Manche, Carottier Reineck**

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2246	SEW 76	49° 21,88 N	00° 05,23 W
2252	SEW 72	49° 21,43 N	00° 03,04 W
2257	SEW 69	49° 21,06 N	00° 01,43 W
2260	SEW 67	49° 20,77 N	00° 00,27 W
2262	SEW 93	49° 20,23 N	00° 00,75 W
2264	SEW 92	49° 20,21 N	00° 01,25 W
2274	FL 26	49° 21,41 N	00° 00,40 W
2278	FL 15	49° 22,05 N	00° 01,34 W
2280	FL 30	49° 21,72 N	00° 01,96 W
2285	FL 33	49° 22,06 N	00° 03,19 W
2287	FL 34	49° 22,15 N	00° 03,55 W
2307	SEW 103	49° 20,08 N	00° 07,86 W
2339	SEW 133	49° 19,75 N	00° 05,14 W
2350	SEW 123	49° 19,75 N	00° 06,03 W
2371	FL 11	49° 22,55 N	00° 02,90 W
2377	FL 16	49° 22,06 N	00° 00,66 W
2381	VAS 90	49° 25,45 N	00° 00,08 W
2401	VAS 109	49° 22,99 N	00° 01,95 W
2418	VAS 47	49° 26,21 N	00° 13,09 W
2432	SEW 49	49° 23,54 N	00° 04,54 W
2435	SEW 53	49° 23,19 N	00° 03,14 W
2447	VAS 30	49° 22,48 N	00° 00,78 E
2452	FL 20	49° 21,52 N	00° 01,02 E
2468	VAS 110	49° 21,65 N	00° 00,53 W
2477	VAS 115	49° 22,31 N	00° 03,00 W
2482	VAS 119	49° 22,76 N	00° 05,00 W
2483	VAS 121	49° 27,90 N	00° 01,02 E
2484	VAS 121	49° 27,94 N	00° 01,13 E
2492	FL 23	49° 21,06 N	00° 00,99 E
2494	FL 21	49° 21,44 N	00° 01,69 E
2496	VAS 34	49° 22,06 N	00° 02,58 E
2509	VAS 129	49° 24,96 N	00° 00,95 E
2511	VAS 129b	49° 25,27 N	00° 00,96 E
2512	VAS 129b	49° 25,27 N	00° 00,89 E
2520	VAS 143	49° 24,50 N	00° 03,00 E
2525	FL 26	49° 21,44 N	00° 00,32 W
2528	SEW 161b	49° 19,98 N	00° 01,80 W
2535	SEW 154	49° 19,85 N	00° 02,89 W
2536	SEW 154	49° 19,85 N	00° 02,89 W
2538	SEW 120	49° 19,07 N	00° 05,85 W
2541	SEW 117	49° 18,86 N	00° 06,96 W
2542	SEW 117	49° 18,91 N	00° 06,92 W
2544	SEW 116	49° 19,03 N	00° 07,05 W
2545	SEW 116	49° 19,06 N	00° 07,01 W
2577	VAS 127b	49° 25,72 N	00° 01,03 E
2578	VAS 112	49° 21,90 N	00° 01,58 W
2581	PNOC 2056	49° 21,68 N	00° 01,59 W
2582	PNOC 2056	49° 21,65 N	00° 01,62 W

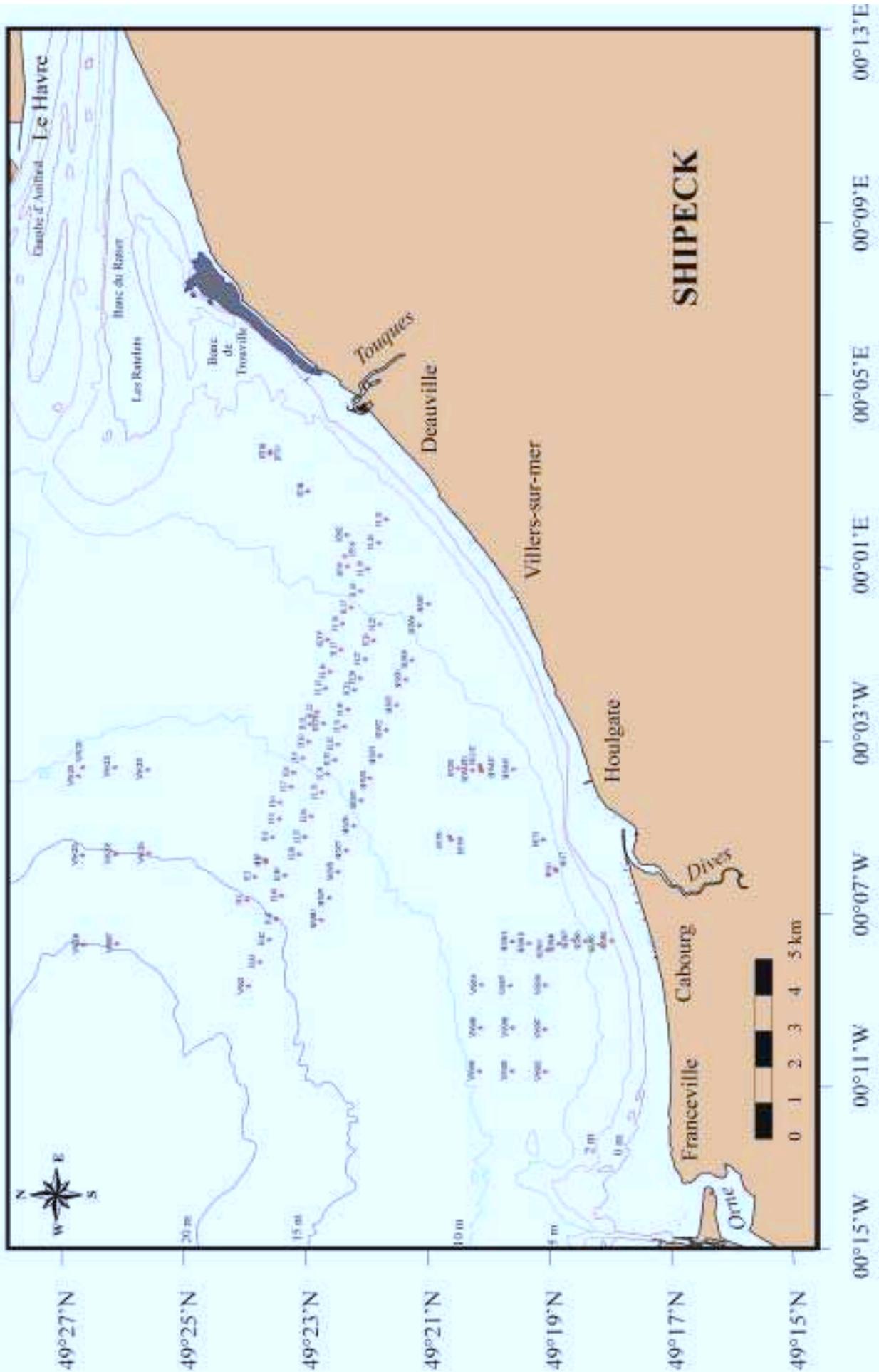


**MISSION VASTEDEBA 2**

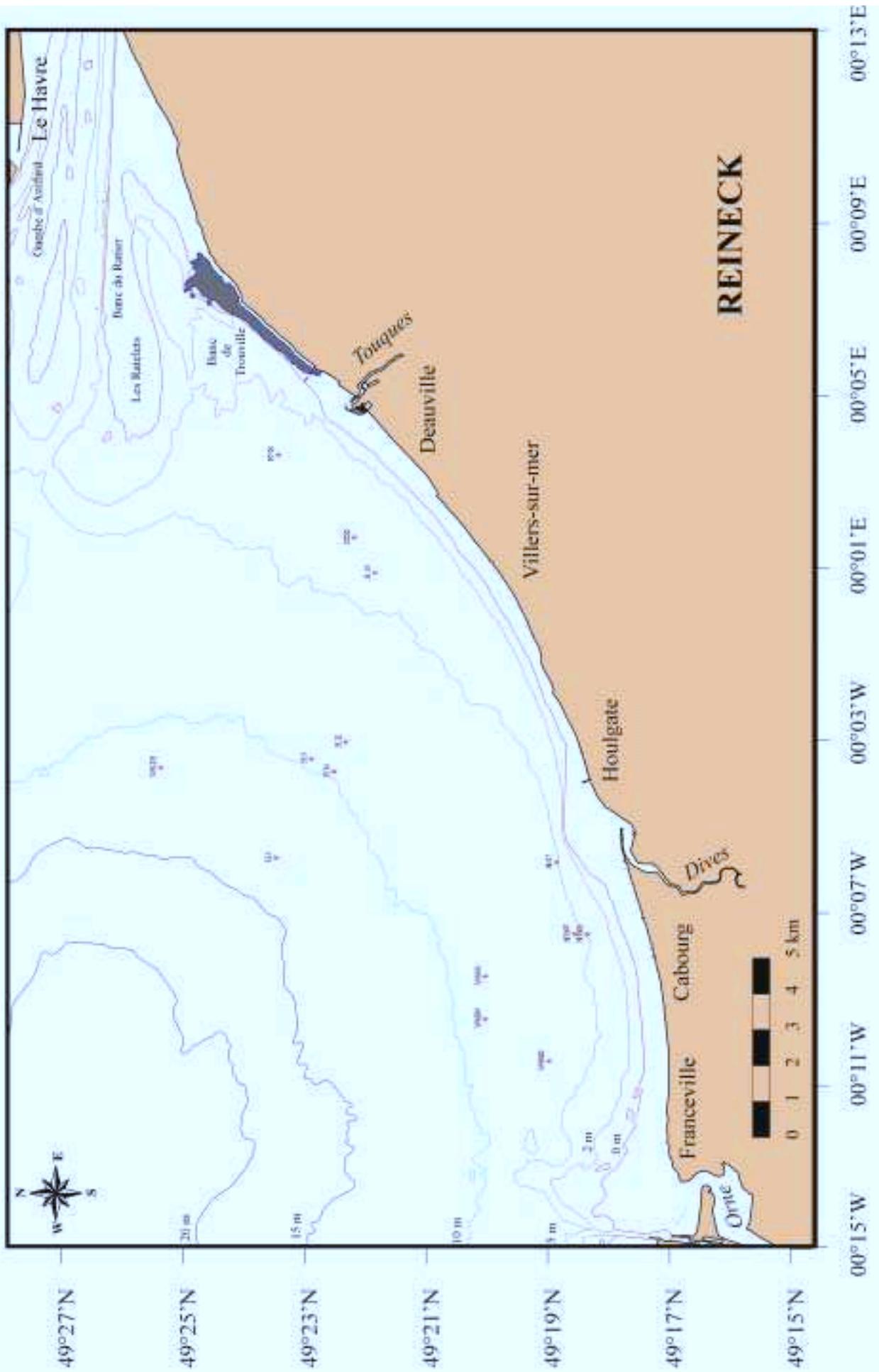
**15 au 21 juin 2000**

**N/O Côtes de la Manche**  
**Chefs de missions: S. Garnaud & P. Lesueur**

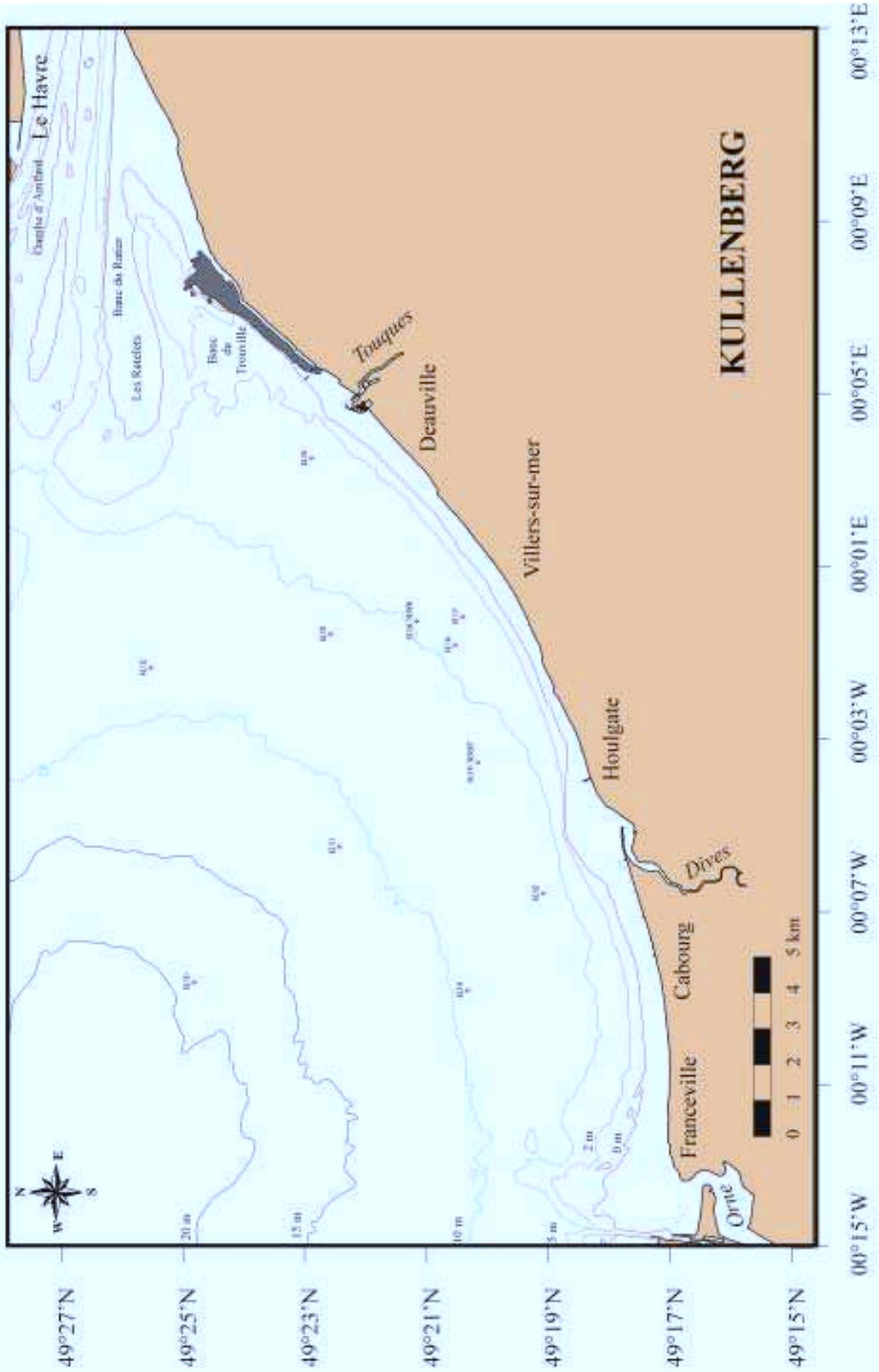
Mission VASTEDEBA II - N/O COTES DE LA MANCHE - JUIN 2000



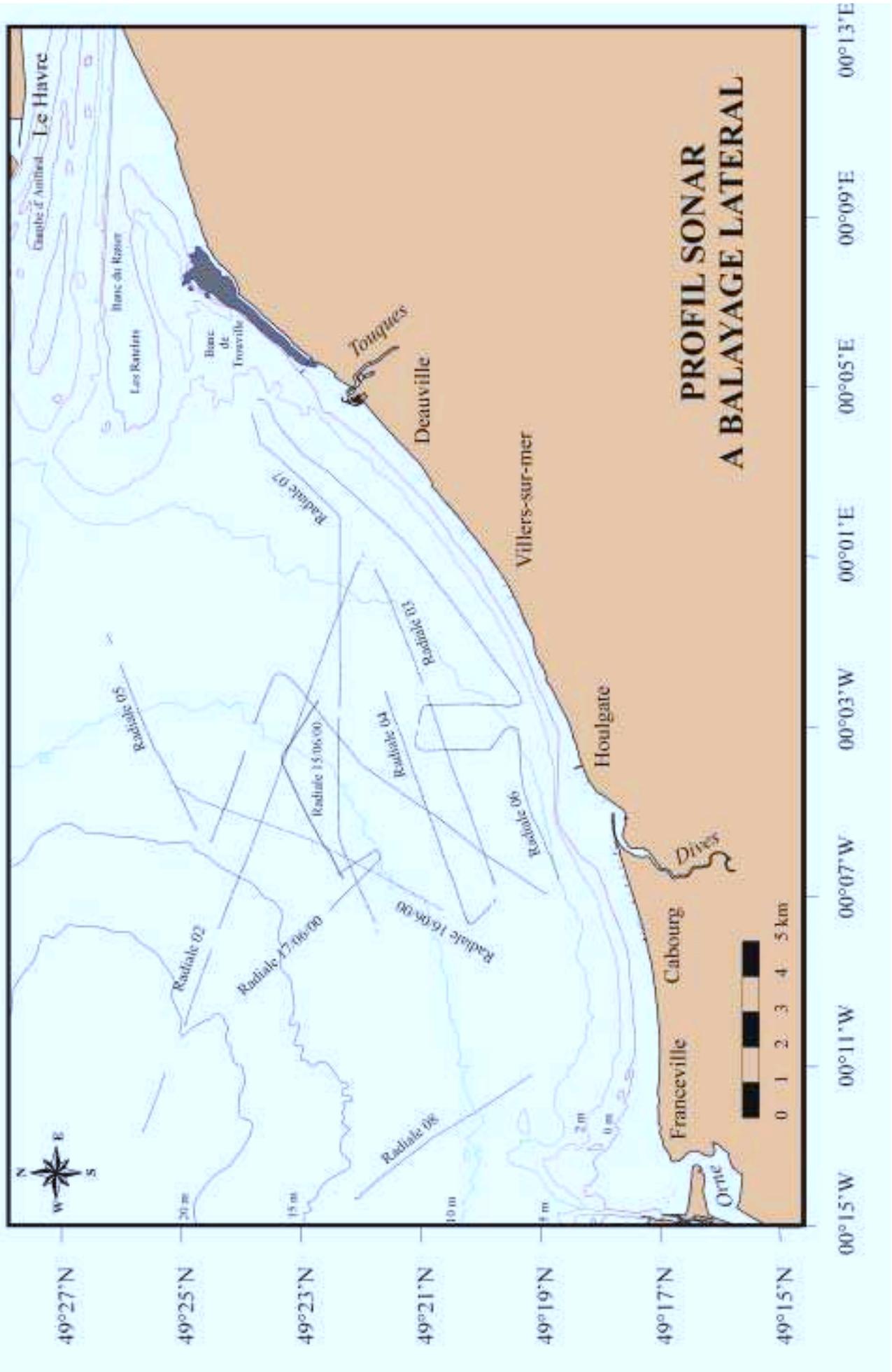
## Mission VASTEDEBA II - N/O COTES DE LA MANCHE - JUNI 2000



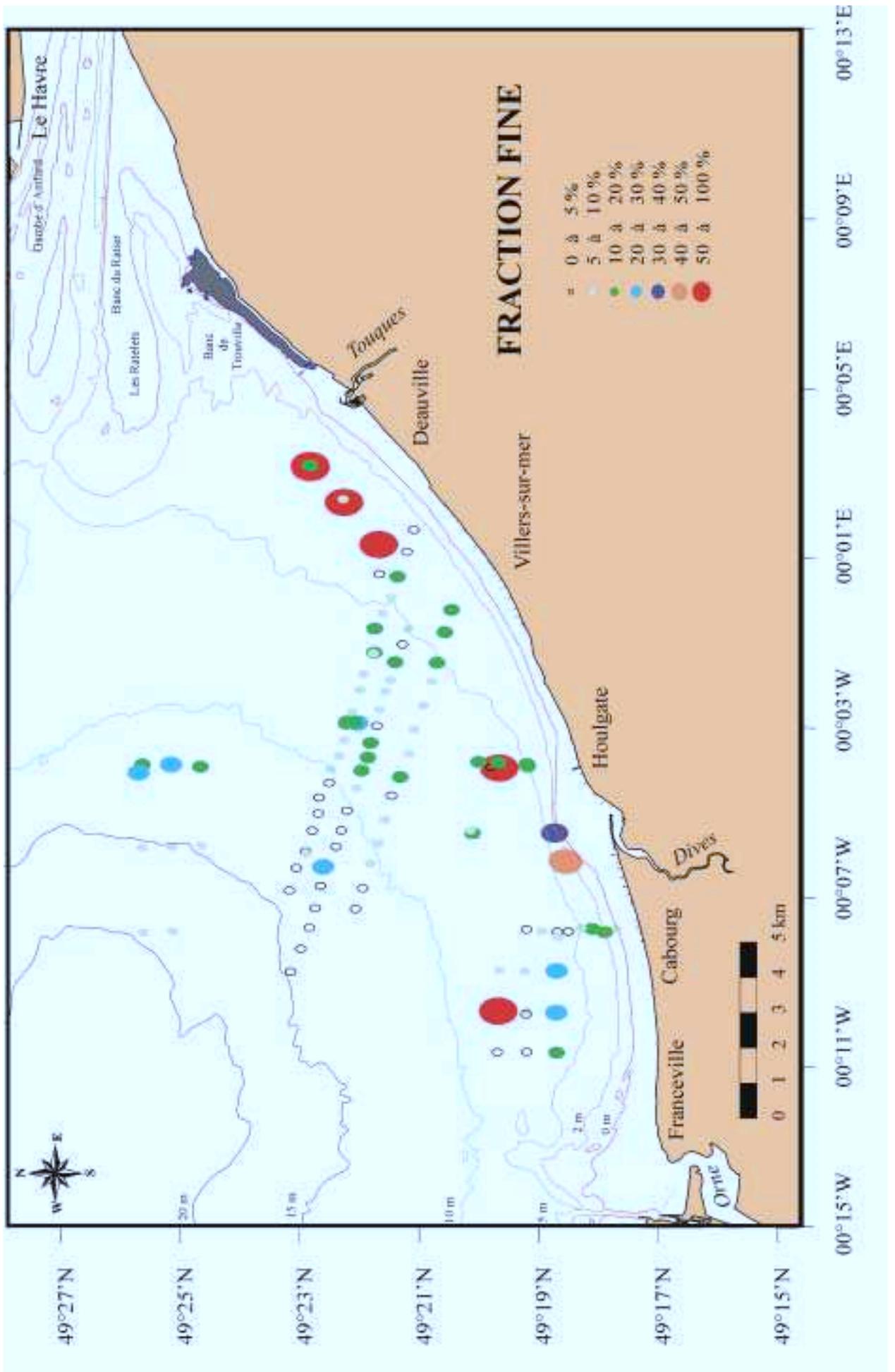
Mission VASTEDEBA II - N/O COTES DE LA MANCHE - JUIN 2000



Mission VASTEDEBA II - N/O COTES DE LA MANCHE - JUIN 2000



Mission VASTEDEBA II - N/O COTES DE LA MANCHE - JUIN 2000



Campagne VASTEDEBA II: 15 et 21 juin 2000 - Côtes de la Manche, Bennes Shipneck

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2583	FL 20	49° 21,59 N	00° 01,19 E
2584	FL 21	49° 21,47 N	00° 01,72 E
2585	FL 19	49° 21,75 N	00° 00,59 E
2587	FL 18	49° 21,86 N	00° 00,09 E
2588	FL 17	49° 22,00 N	00° 00,29 W
2589	FL 16	49° 22,13 N	00° 00,66 W
2590	FL 15	49° 22,14 N	00° 01,23 W
2591	FL 15	49° 22,16 N	00° 01,26 W
2592	FL 14	49° 22,32 N	00° 01,76 W
2593	FL 13	49° 22,39 N	00° 02,14 W
2594	FL 12	49° 22,52 N	00° 02,67 W
2595	FL11	49° 22,61 N	00° 02,90 W
2596	FL11	49° 22,62 N	00° 02,95 W
2597	FL10	49° 22,64 N	00° 03,35 W
2598	FL9	49° 22,74 N	00° 03,73 W
2600	FL8	49° 22,87 N	00° 04,06 W
2601	FL7	49° 22,91 N	00° 04,38 W
2602	FL6	49° 23,07 N	00° 04,74 W
2603	FL5	49° 23,09 N	00° 05,12 W
2604	FL4	49° 23,19 N	00° 05,53 W
2605	FL3	49° 23,30 N	00° 06,04 W
2606	FL3	49° 23,29 N	00° 06,10 W
2608	FL2	49° 23,46 N	00° 06,43 W
2609	FL1	49° 23,57 N	00° 06,97 W
2610	VAS21	49° 23,56 N	00° 08,93 W
2611	FL43	49° 23,38 N	00° 08,38 W
2612	FL42	49° 23,24 N	00° 07,87 W
2613	FL41	49° 23,14 N	00° 07,40 W
2614	FL40	49° 23,05 N	00° 06,87 W
2615	FL39	49° 23,01 N	00° 06,41 W
2616	FL38	49° 22,79 N	00° 05,92 W
2617	FL37	49° 22,70 N	00° 05,53 W
2618	FL36	49° 22,61 N	00° 05,05 W
2619	FL 35	49° 22,44 N	00° 04,51 W
2620	FL34	49° 22,36 N	00° 04,08 W
2622	FL33	49° 22,25 N	00° 03,77 W
2623	FL32	49° 22,21 N	00° 03,42 W
2624	FL31	49° 22,10 N	00° 03,01 W
2625	FL30	49° 22,05 N	00° 02,62 W
2626	FL29	49° 21,95 N	00° 02,17 W
2627	FL28	49° 21,87 N	00° 01,90 W

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2627	FL28	49° 21,87 N	00° 01,90 W
2628	FL27	49° 21,79 N	00° 01,47 W
2629	FL26	49° 21,67 N	00° 01,04 W
2630	FL25	49° 21,57 N	00° 00,67 W
2631	VAS184	49° 20,07 N	00° 10,88 W
2632	VAS183	49° 19,57 N	00° 10,87 W
2633	VAS182	49° 19,07 N	00° 10,89 W
2635	VAS187	49° 19,07 N	00° 09,92 W
2636	VAS188	49° 19,57 N	00° 09,88 W
2637	VAS189	49° 20,05 N	00° 09,88 W
2639	VAS188	49° 19,59 N	00° 09,96 W
2640	VAS196	49° 20,04 N	00° 08,90 W
2642	VAS197	49° 19,61 N	00° 08,92 W
2643	VAS198	49° 19,07 N	00° 08,92 W
2644	SEW94	49° 18,07 N	00° 07,90 W
2645	SEW95	49° 18,26 N	00° 07,98 W
2646	SEW96	49° 18,47 N	00° 07,90 W
2648	SEW97	49° 18,66 N	00° 07,88 W
2650	SEW98	49° 18,87 N	00° 07,97 W
2651	SEW99	49° 19,05 N	00° 07,97 W
2652	SEW99	49° 19,04 N	00° 08,11 W
2653	SEW100	49° 19,32 N	00° 07,96 W
2654	SEW101	49° 19,57 N	00° 07,92 W
2655	SEW145	49° 19,57 N	00° 03,92 W
2656	SEW145	49° 19,55 N	00° 03,98 W
2657	SEW147	49° 20,05 N	00° 03,95 W
2658	SEW147	49° 20,04 N	00° 04,02 W
2659	SEW147B	49° 20,17 N	00° 04,00 W
2660	SEW67	49° 20,84 N	00° 00,21 W
2661	SEW68	49° 20,97 N	00° 00,70 W
2662	SEW68	49° 20,95 N	00° 00,75 W
2663	SEW69	49° 21,08 N	00° 01,49 W
2664	SEW70	49° 21,18 N	00° 01,93 W
2665	SEW71	49° 21,32 N	00° 02,52 W
2666	SEW72	49° 21,47 N	00° 03,09 W
2667	SEW73	49° 21,57 N	00° 03,68 W
2668	SEW74	49° 21,72 N	00° 04,19 W
2669	SEW74	49° 21,71 N	00° 04,24 W
2670	SEW75	49° 21,85 N	00° 04,69 W
2671	SEW76	49° 21,97 N	00° 05,27 W
2672	SEW77	49° 22,08 N	00° 05,84 W

Campagne VASTEDEBA II: 15 et 21 juin 2000 - Benes Shipack

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2673	SEW78	49° 22,20 N	00° 06,33 W
2674	SEW79	49° 22,34 N	00° 06,92 W
2675	SEW80	49° 22,46 N	00° 07,42 W
2676	VAS207	49° 25,54 N	00° 07,97 W
2677	VAS208	49° 26,04 N	00° 07,99 W
2682	KU 05	49° 22,36 N	00° 01,02 W
2689	VAS 206	49° 25,06 N	00° 05,90 W
2690	VAS 205	49° 25,56 N	00° 05,93 W
2691	VAS 204	49° 26,06 N	00° 05,94 W
2692	VAS 200	49° 26,05 N	00° 03,94 W
2693	VAS 201	49° 26,12 N	00° 04,13 W
2694	VAS 202	49° 25,57 N	00° 03,94 W
2695	VAS 203	49° 25,08 N	00° 03,99 W
2697	R5/353	49° 20,49 N	00° 05,59 W
2698	R5/350	49° 20,52 N	00° 05,53 W
2699	R5/250	49° 20,38 N	00° 03,89 W
2700	R5/250	49° 20,39 N	00° 03,95 W
2701	R6/22-23	49° 20,06 N	00° 03,89 W
2702	R5/250	49° 22,43 N	00° 02,93 W
2703	R5/250	49° 22,47 N	00° 02,93 W
2704	R7/99	49° 22,06 N	00° 00,65 E
2705	R7/94	49° 22,07 N	00° 00,86 E
2706	R7/94	49° 22,10 N	00° 00,88 E
2707S	R7/82	49° 22,07 N	00° 01,37 E
2709	R7/48	49° 22,65 N	00° 02,38 E
2710	R7/48	49° 22,67 N	00° 02,46 E
2711	R7/19	49° 23,22 N	00° 03,22 E
2712	R7/18	49° 23,22 N	00° 03,27 E
2714	R6/135	49° 20,38 N	00° 03,87 W
2715	R6/33	49° 19,10 N	00° 05,59 W
2716	R6/17	49° 18,92 N	00° 06,25 W
2718	R6/16	49° 18,91 N	00° 06,30 W

Campagne VASTEDEBA II: 15 et 21 juin 2000 - Reineck

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2586	FL 19	49° 21,75 N	00° 00,57 E
2599	FL9	49° 22,74 N	00° 03,78 W
2607	FL3	49° 23,29 N	00° 06,10 W
2621	FL34	49° 22,38 N	00° 04,09 W
2623bis	FL32	49° 22,20 N	00° 03,39 W
2634	VAS182	49° 19,06 N	00° 10,86 W
2638	VAS189	49° 20,04 N	00° 09,88 W
2641	VAS196	49° 20,04 N	00° 08,88 W
2647	SEW96	49° 18,46 N	00° 07,89 W
2649	SEW97	49° 18,66 N	00° 07,89 W
2678	KU 01	49° 20,23 N	00° 09,24 W
2679	KU 02	49° 19,06 N	00° 07,00 W
2680	KU 03 / SEW147	49° 20,07 N	00° 03,99 W
2681	KU 04 / SEW68	49° 21,02 N	00° 00,72 W
2682	KU 05	49° 22,36 N	00° 01,02 W
2683	KU 10	49° 24,47 N	00° 09,05 W
2684	KU 11	49° 22,22 N	00° 05,92 W
2685	KU 12	49° 25,14 N	00° 01,80 W
2686	KU 06	49° 22,65 N	00° 03,04 E
2687	KU 13	49° 20,31 N	00° 00,62 W
2688	KU 14	49° 20,42 N	00° 01,28 W
2696	VAS 203	49° 25,08 N	00° 03,99 W
2708	R7/82	49° 22,07 N	00° 01,40 E
2713	R7/18	49° 23,25 N	00° 03,34 E
2717	R6/17	49° 18,94 N	00° 06,21 W

Campagne VASTEDEBA II: 15 et 21 juin 2000 - Küllenberg

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2678	KU 01	49° 20,23 N	00° 09,24 W
2679	KU 02	49° 19,06 N	00° 07,00 W
2680	KU 03 / SEW147	49° 20,07 N	00° 03,99 W
2681	KU 04 / SEW68	49° 21,02 N	00° 00,72 W
2682	KU 05	49° 22,36 N	00° 01,02 W
2683	KU 10	49° 24,47 N	00° 09,05 W
2684	KU 11	49° 22,22 N	00° 05,92 W
2685	KU 12	49° 25,14 N	00° 01,80 W
2686	KU 06	49° 22,65 N	00° 03,04 E
2687	KU 13	49° 20,31 N	00° 00,62 W
2688	KU 14	49° 20,42 N	00° 01,28 W



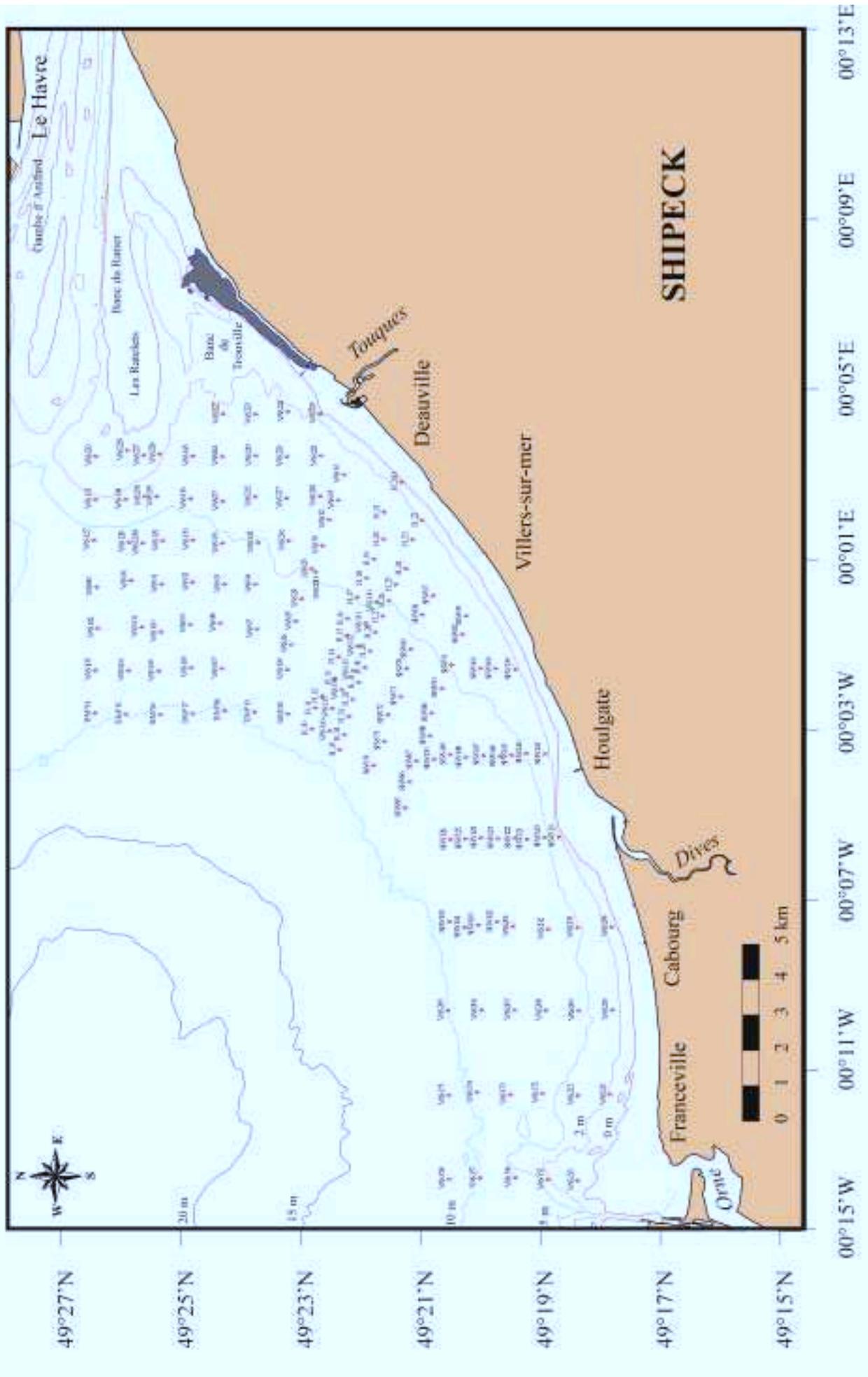
**MISSION VASTEDEBA 3**

**08 au 22 juin 2001**

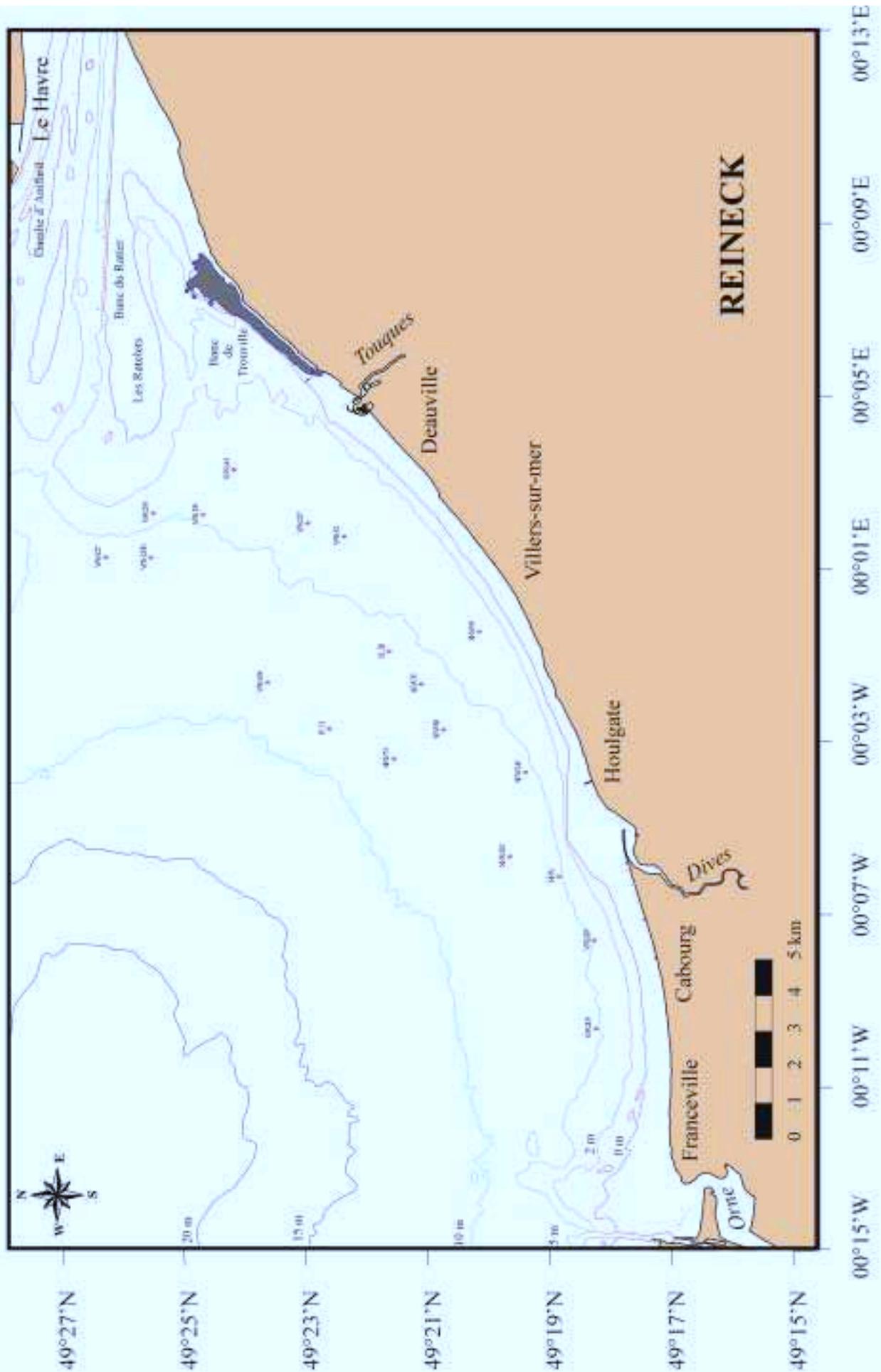
**N/O Thalia**

**Chefs de missions: S. Garnaud, P. Lesueur & P. Bassoullet**

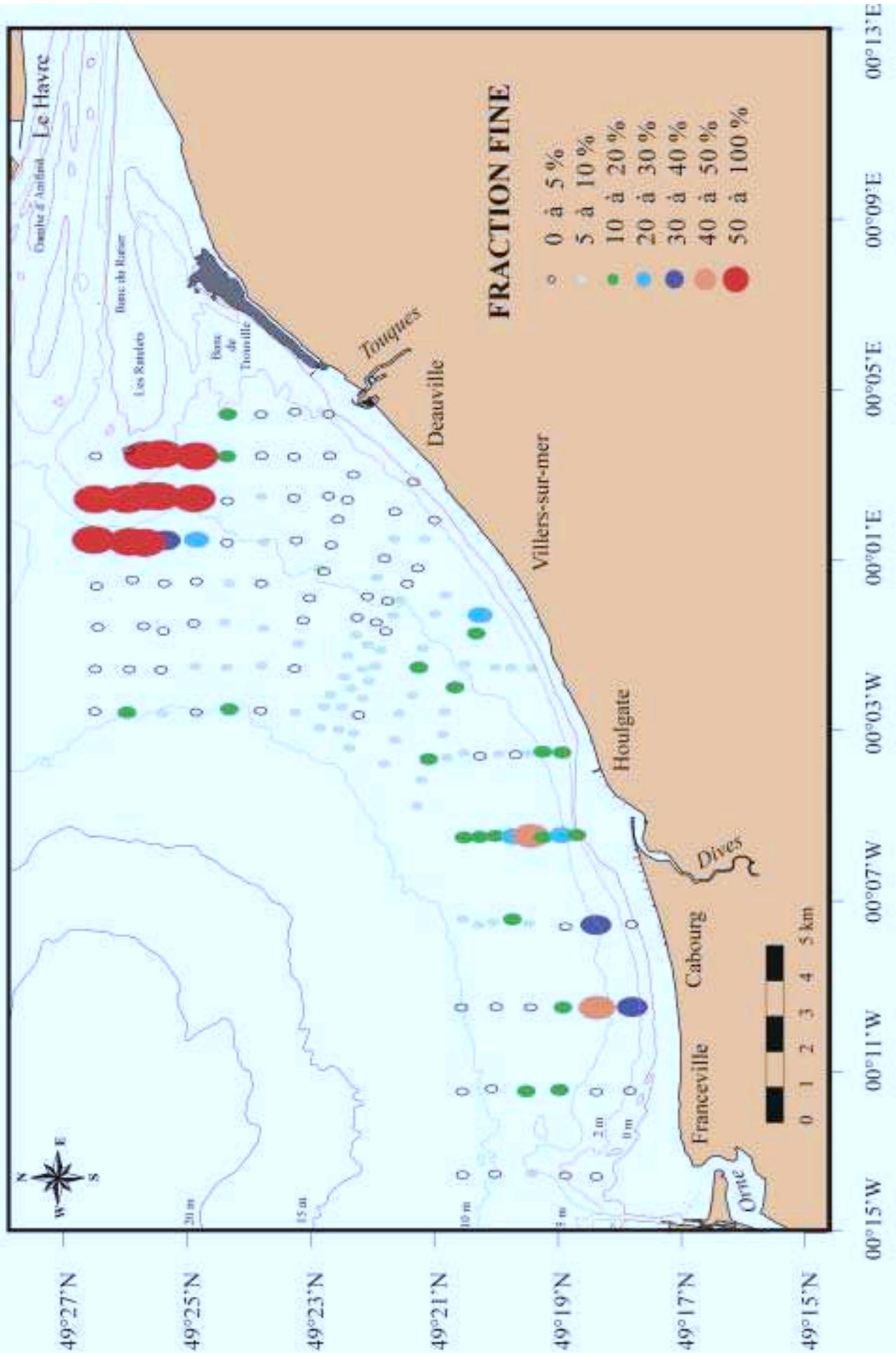
Mission VASTEDEBA III - N/O THALIA - JUIN 2001



## Mission VASTEDEBA III - N/O THALIA - JUNI 2001



Mission VASTEDEBA III - N/O THALIA - JUIN 2001



Campagne VASTEDEBA III: 08 au 22 juin 2001 - Thalia, Benne Shipeck

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2863	VAS 222	49° 24,03 N	00° 03,99 W
2864	VAS144	49° 24,08 N	00° 02,99 W
2865	VAS137	49° 24,05 N	00° 01,94 W
2866	VAS 131	49° 24,07 N	00° 00,95 W
2867	VAS 93	49° 26,93 N	00° 00,01 E
2868	VAS 223	49° 25,02 N	00° 03,98 W
2869	VAS 225	49° 23,99 N	00° 03,99 W
2870	VAS 221	49° 23,93 N	00° 03,01 W
2871	VAS 34	49° 22,51 N	00° 02,56 W
2872	VAS 33	49° 22,87 N	00° 01,96 W
2873	VAS 32	49° 23,44 N	00° 01,51 W
2874	VAS 218	49° 24,00 N	00° 02,06 W
2875	VAS 224	49° 23,01 N	00° 04,04 W
2876	VAS 220	49° 23,06 N	00° 02,98 W
2877	VAS 217	49° 23,07 N	00° 02,01 W
2878	VAS 216	49° 25,93 N	00° 01,01 W
2879	VAS 30	49° 23,84 N	00° 00,90 W
2880	VAS 29	49° 24,53 N	00° 00,35 W
2881	VAS 29B	49° 24,28 N	00° 00,28 W
2882	VAS 24	49° 25,13 N	00° 00,35 E
2883	VAS 25	49° 25,51 N	00° 00,88 E
2884	VAS 26	49° 25,79 N	00° 01,42 E
2885	VAS 109	49° 23,03 N	00° 02,01 E
2886	VAS 97	49° 24,90 N	00° 01,06 E
2887	VAS 94	49° 25,01 N	00° 00,01 E
2888	VAS 132	49° 24,86 N	00° 00,97 W
2889	VAS 215	49° 25,02 N	00° 02,05 W
2890	VAS 219	49° 24,99 N	00° 03,01 W
2894	FL 10	49° 24,50 N	00° 03,41 E
2895	FL 11	49° 24,28 N	00° 02,91 E
2896	FL 12	49° 23,87 N	00° 02,64 E
2897	FL 13	49° 23,05 N	00° 02,22 E
2898	FL 14	49° 22,85 N	00° 01,71 E
2899	FL 15	49° 22,35 N	00° 01,22 E
2900	FL 16	49° 22,29 N	00° 00,81 E
2901	FL 17	49° 24,68 N	00° 00,32 E
2902	FL 18	49° 24,12 N	00° 00,13 W
2903	FL 25	49° 22,29 N	00° 00,02 E
2904	FL 26	49° 22,72 N	00° 00,40 E
2905	FL 27	49° 23,12 N	00° 00,76 E
2906	FL 28	49° 23,57 N	00° 01,14 E

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2907	FL 29	49° 23,88 N	00° 01,58 E
2908	FL 30	49° 24,19 N	00° 01,96 E
2909	FL 31	49° 24,59 N	00° 02,31 E
2910	FL 32	49° 24,96 N	00° 02,71 E
2911	FL 33	49° 22,20 N	00° 03,11 E
2912	FL 34	49° 22,49 N	00° 03,54 E
2913	FL 35	49° 22,76 N	00° 03,89 E
2914	VAS 116	49° 23,39 N	00° 03,45 E
2915	VAS 115	49° 23,23 N	00° 02,92 E
2916	VAS 114	49° 22,65 N	00° 02,48 E
2917	VAS 113	49° 24,96 N	00° 02,03 E
2918	VAS 112	49° 24,65 N	00° 01,46 E
2919	VAS 111	49° 24,15 N	00° 00,92 E
2920	VAS 110	49° 23,46 N	00° 00,42 E
2921	FL 19	49° 23,65 N	00° 00,58 W
2922	FL 20	49° 23,05 N	00° 01,04 W
2923	FL 21	49° 23,02 N	00° 01,68 W
2924	FL 21B	49° 21,92 N	00° 02,39 W
2925	FL 22	49° 23,66 N	00° 01,49 W
2926	FL 23	49° 21,24 N	00° 01,04 W
2927	FL 24	49° 21,66 N	00° 00,36 W
2928	SEW 67	49° 22,97 N	00° 00,28 E
2929	SEW 68	49° 23,64 N	00° 00,72 E
2930	SEW 69	49° 21,35 N	00° 01,53 E
2931	SEW 70	49° 21,60 N	00° 01,99 E
2932	SEW 71	49° 21,97 N	00° 02,64 E
2933	SEW 72	49° 22,79 N	00° 03,07 E
2934	SEW 73	49° 23,00 N	00° 03,70 E
2935	SEW 74	49° 23,66 N	00° 04,26 E
2940	SEW 85	49° 21,71 N	00° 05,26 E
2941	SEW 86	49° 21,43 N	00° 04,64 E
2942	SEW 87	49° 21,00 N	00° 04,15 E
2943	SEW 88	49° 23,16 N	00° 03,57 E
2944	SEW 89	49° 23,05 N	00° 03,03 E
2945	SEW 90	49° 22,42 N	00° 02,46 E
2946	SEW 91	49° 21,80 N	00° 01,90 E
2947	SEW 150	49° 20,73 N	00° 04,11 E
2948	SEW 149	49° 21,90 N	00° 04,01 E
2949	SEW 148	49° 20,94 N	00° 04,08 E
2950	SEW 147	49° 22,82 N	00° 04,03 E
2951	SEW 146	49° 21,81 N	00° 04,04 E

Campagne VASTEDEBA III: 08 au 22 juin 2001 - Thalia, Benne Shipeck

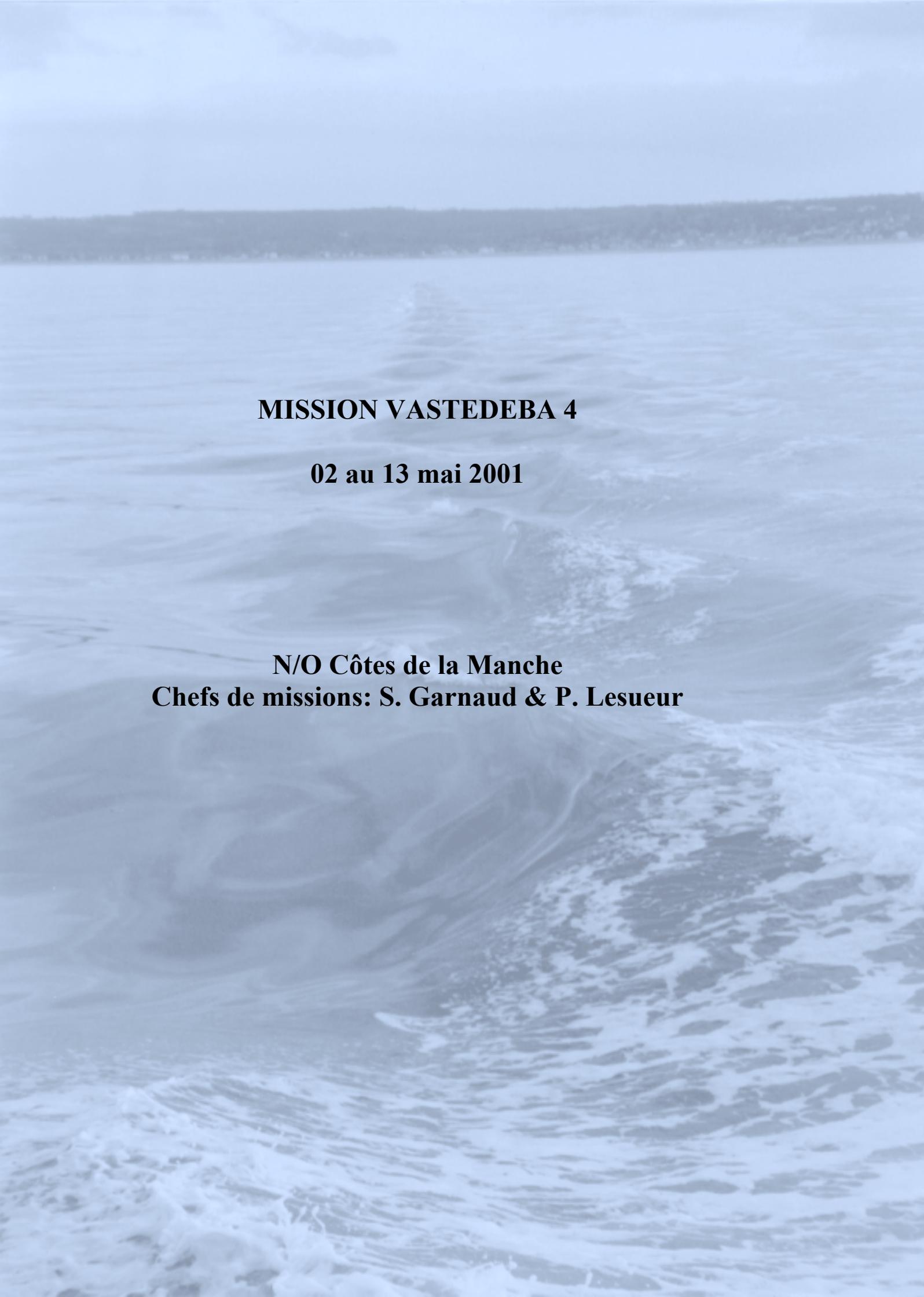
A-30

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2952	SEW 145	49° 21,08 N	00° 04,02 E
2953	SEW 144	49° 20,18 N	00° 03,97 E
2954	SEW 126	49° 21,89 N	00° 06,00 E
2955	SEW 125	49° 20,95 N	00° 05,98 E
2956	SEW 124	49° 20,01 N	00° 05,96 E
2957	SEW 123	49° 21,94 N	00° 05,97 E
2958	SEW 122	49° 20,89 N	00° 05,96 E
2959	SEW 121	49° 20,15 N	00° 05,99 E
2960	SEW 120	49° 19,04 N	00° 05,94 E
2961	SEW 119	49° 21,14 N	00° 05,94 E
2962	SEW 93	49° 20,23 N	00° 00,75 E
2963	SEW 92	49° 21,15 N	00° 01,19 E
2964	SEW 161	49° 20,01 N	00° 01,99 E
2965	SEW 160	49° 22,08 N	00° 01,99 E
2966	SEW 159	49° 20,85 N	00° 02,00 E
2967	SEW 143	49° 19,02 N	00° 03,99 E
2968	SEW 105	49° 21,96 N	00° 07,93 E
2969	SEW 104	49° 21,02 N	00° 08,06 E
2970	SEW 103	49° 20,16 N	00° 08,00 E
2971	SEW 102	49° 22,00 N	00° 07,93 E
2972	VAS 201	49° 21,01 N	00° 08,03 E
2973	VAS 202	49° 21,81 N	00° 08,10 E
2974	VAS 203	49° 19,99 N	00° 08,06 E
2975	VAS 204	49° 20,87 N	00° 08,05 E
2978	VAS 205	49° 22,04 N	00° 10,01 E
2979	VAS 206	49° 22,97 N	00° 10,00 E
2980	VAS 207	49° 20,91 N	00° 10,01 E
2981	VAS 208	49° 21,97 N	00° 10,01 E
2982	VAS 209	49° 19,93 N	00° 10,01 E
2983	VAS 172	49° 19,18 N	00° 11,95 E
2984	VAS 173	49° 21,17 N	00° 11,98 E
2985	VAS 174	49° 20,24 N	00° 11,93 E
2986	VAS 175	49° 22,00 N	00° 11,99 E
2987	VAS 158	49° 21,98 N	00° 13,96 E
2988	VAS 157	49° 20,04 N	00° 13,94 E
2989	VAS 156	49° 20,86 N	00° 13,93 E
2990	VAS 155	49° 21,83 N	00° 13,97 E
2991	VAS 212	49° 19,96 N	00° 12,00 E
2992	VAS 211	49° 20,96 N	00° 11,98 E
2993	VAS 210	49° 20,82 N	00° 10,00 E
2994	VAS 213	49° 19,97 N	00° 14,00 E

Numéro	Site	Latitude	Longitude
3003	TEMP 14	49° 28,99 N	00° 03,03 E
3004	TEMP 15	49° 27,06 N	00° 03,05 E
3005	TEMP 16	49° 27,93 N	00° 03,07 E
3006	TEMP 17	49° 25,91 N	00° 03,05 E
3007	TEMP 18	49° 26,93 N	00° 02,97 E
3008	TEMP 19	49° 25,06 N	00° 03,01 E
3009	TEMP 20	49° 23,00 N	00° 03,05 E
3010	VAS 98	49° 24,21 N	00° 00,92 E
3011	VAS 99	49° 26,07 N	00° 00,95 E
3012	VAS 100	49° 27,88 N	00° 01,13 E
3013	VAS 101	49° 26,07 N	00° 01,01 E
3014	VAS 102	49° 28,80 N	00° 01,04 E
3015	VAS 89	49° 28,88 N	00° 00,07 E
3016	VAS 90	49° 26,73 N	00° 00,08 W
3017	VAS 91	49° 27,84 N	00° 00,01 E
3018	VAS 92	49° 25,91 N	00° 00,04 W
3019	VAS 130	49° 25,89 N	00° 01,03 W
3020	VAS 129	49° 27,77 N	00° 01,01 W
3021	VAS 129B	49° 26,01 N	00° 00,95 W
3022	VAS 128	49° 26,87 N	00° 00,97 W
3023	VAS 127	49° 26,04 N	00° 01,02 W
3024	VAS 133	49° 28,94 N	00° 01,98 W
3025	VAS 134	49° 27,07 N	00° 01,98 W
3026	VAS 230	49° 25,89 N	00° 02,05 W
3027	VAS 135	49° 25,14 N	00° 02,05 W
3028	VAS 136	49° 26,04 N	00° 02,00 W
3029	VAS 143	49° 25,90 N	00° 03,00 W
3030	VAS 226	49° 27,98 N	00° 03,05 W
3031	VAS 227	49° 25,95 N	00° 03,01 W
3032	VAS 228	49° 26,97 N	00° 03,13 W
3033	VAS 229	49° 28,93 N	00° 03,00 W
3040	VAS108	49° 23,50 N	00° 01,94 E
3041	VAS 107	49° 24,10 N	00° 01,99 E
3042	VAS 106	49° 25,99 N	00° 01,96 E
3043	VAS 105	49° 25,03 N	00° 02,05 E
3044	VAS 104	49° 26,91 N	00° 02,04 E
3045	VAS 103	49° 28,96 N	00° 02,03 E

## Campagne VASTEDEBA III: 08 au 22 juin 2001 - Thalia, Reineck

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2891	VAS 144	49° 24,02 N	00° 03,03 E
2936	VAS 32	49° 22,32 N	00° 01,47 E
2937	VAS 217	49° 22,88 N	00° 01,78 E
2938	FL 28	49° 21,62 N	00° 01,22 W
2939	FL 11	49° 22,55 N	00° 03,02 W
2976	NEW	49° 18,99 N	00° 06,48 W
2977	SEW 123	49° 19,75 N	00° 06,00 W
2995	VAS 209	49° 18,42 N	00° 10,03 W
2996	VAS 203	49° 18,45 N	00° 07,96 W
2997	SEW 145	49° 19,51 N	00° 04,04 W
2998	SEW 93	49° 20,23 N	00° 00,75 W
3000	SEW 89	49° 20,78 N	00° 03,04 W
3001	SEW 70	49° 21,12 N	00° 01,98 W
3002	SEW 73	49° 21,55 N	00° 03,72 W
3036	VAS 230	49° 25,27 N	00° 02,02 E
3037	VAS 136	49° 24,50 N	00° 01,98 E
3038	VAS 129B	49° 25,31 N	00° 00,98 E
3039	VAS 127	49° 26,01 N	00° 00,98 E

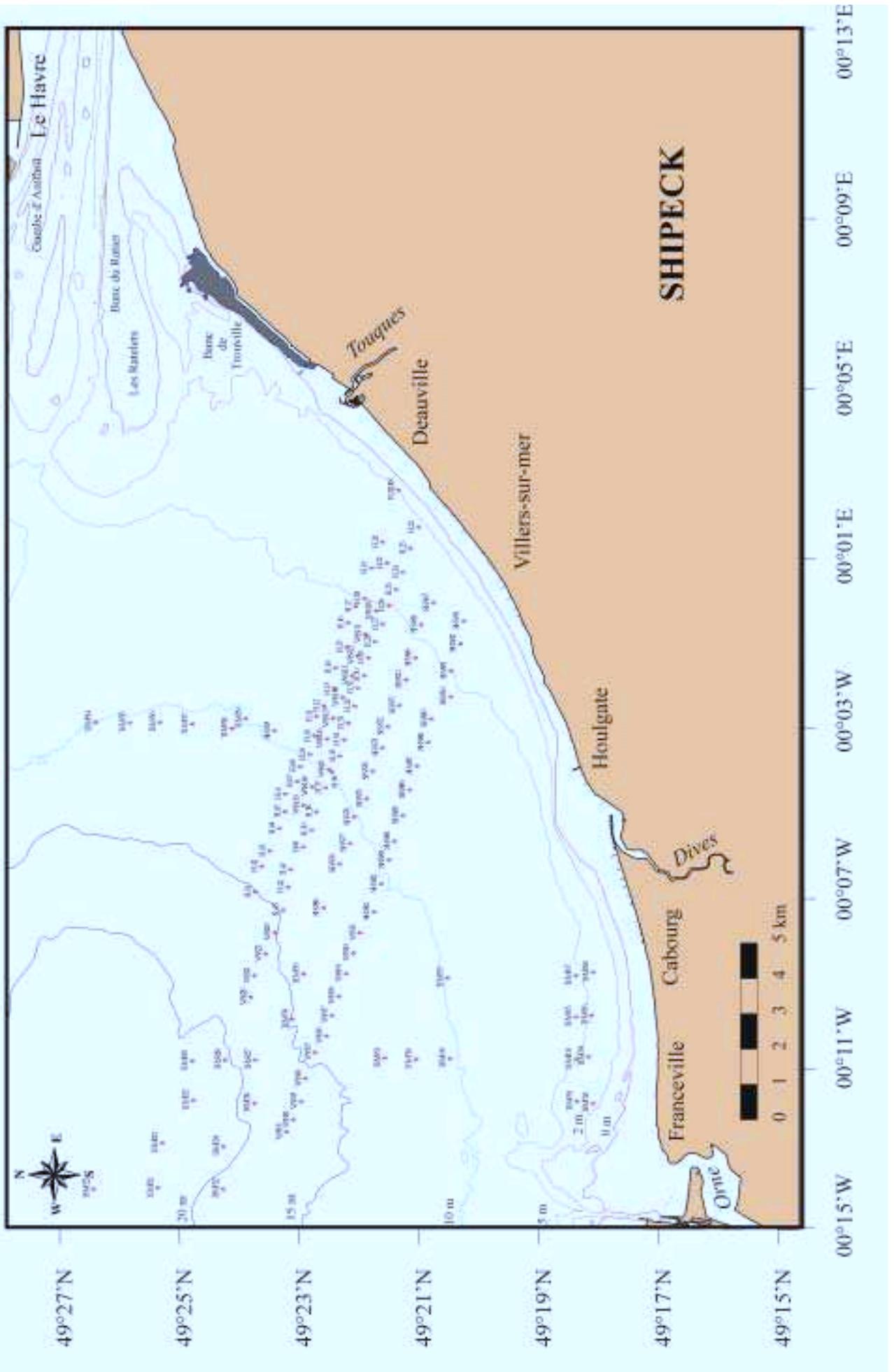


**MISSION VASTEDEBA 4**

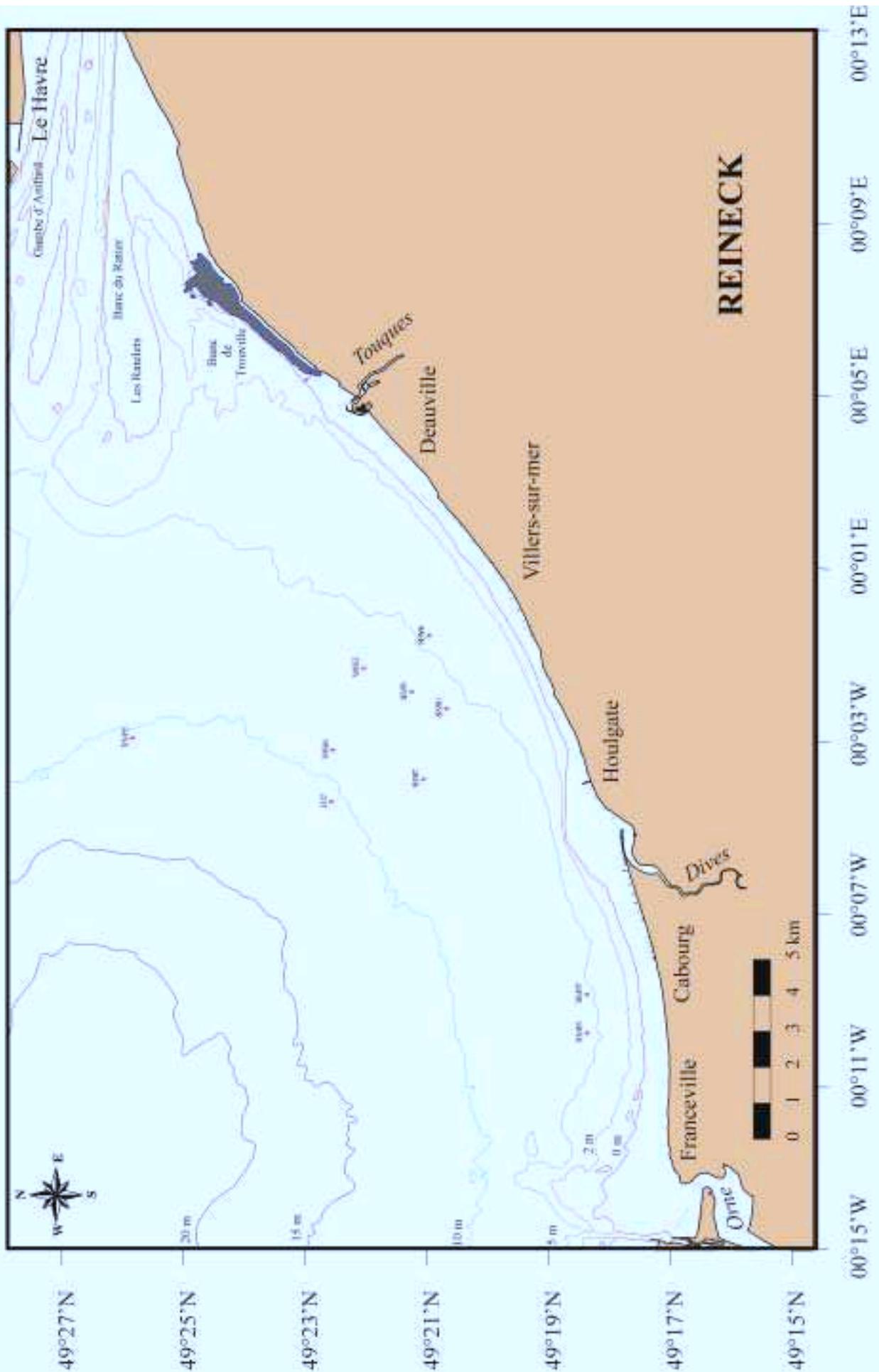
**02 au 13 mai 2001**

**N/O Côtes de la Manche**  
**Chefs de missions: S. Garnaud & P. Lesueur**

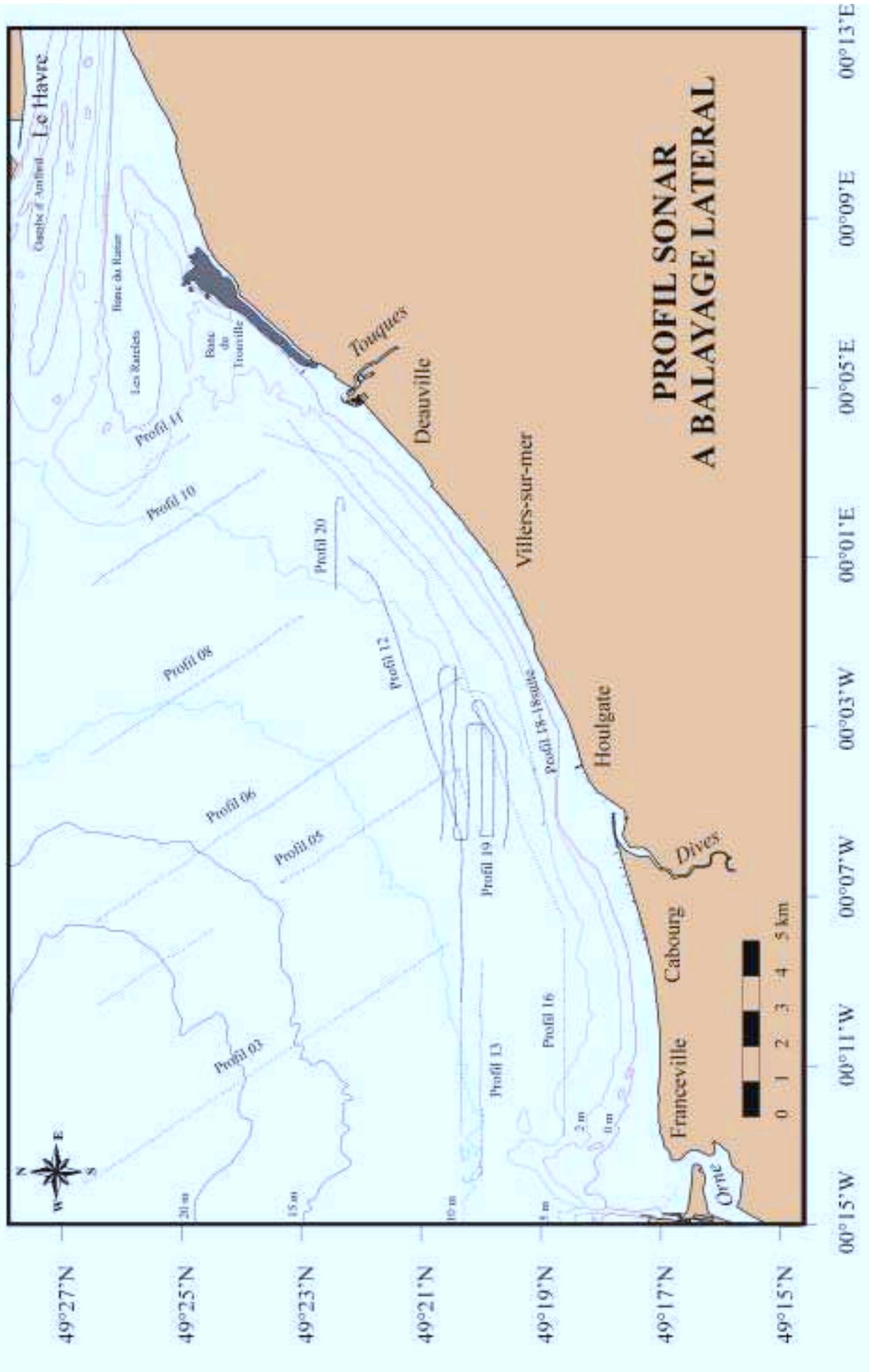
## Mission VASTEDEBA IV - N/O COTES DE LA MANCHE - MAI 2001



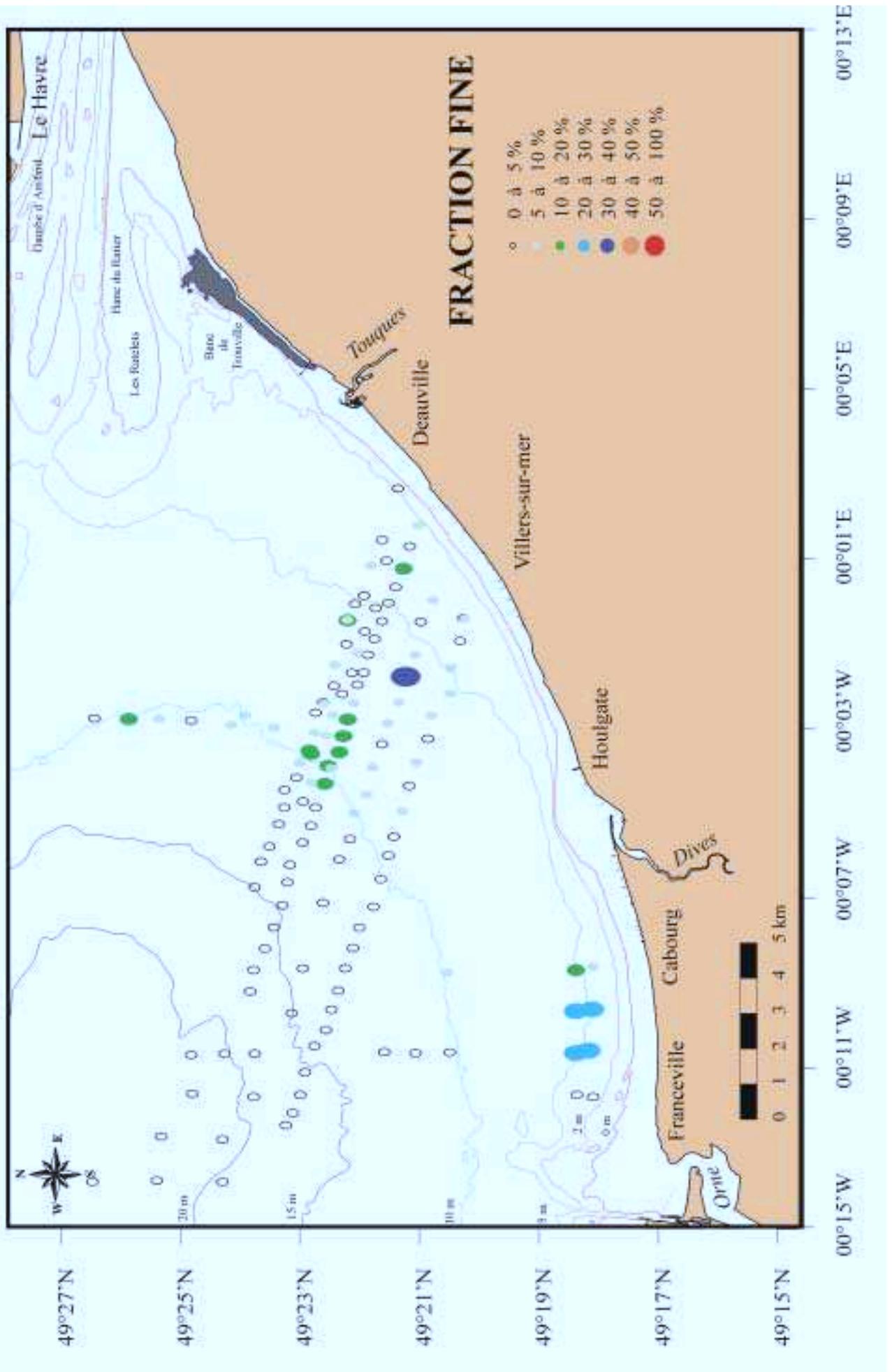
## Mission VASTEDEBA IV - N/O COTES DE LA MANCHE - MAI 2001



**Mission VASTEDEBA IV - N/O COTES DE LA MANCHE - MAI 2001**



Mission VASTEDEBA IV - N/O COTES DE LA MANCHE - MAI 2001



**Campagne VASTEDEBA IV: 02 au 13 mai 2001 - Côtes de la Manche, Bennes Shipeck**

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2719	FL01	49° 23,50 N	00° 07,07 W
2720	FL02	49° 23,40 N	00° 06,47 W
2721	FL03	49° 23,27 N	00° 06,11 W
2722	FL04	49° 23,13 N	00° 05,58 W
2723	FL05	49° 23,04 N	00° 05,18 W
2724	FL06	49° 23,04 N	00° 04,77 W
2725	FL07	49° 22,85 N	00° 04,47 W
2726	FL08	49° 22,80 N	00° 04,12 W
2727	FL09	49° 22,65 N	00° 03,84 W
2728	FL09	49° 22,62 N	00° 03,92 W
2729	FL10	49° 22,58 N	00° 03,41 W
2730	FL11	49° 22,55 N	00° 02,94 W
2731	FL12	49° 22,44 N	00° 02,70 W
2732	FL12	49° 22,42 N	00° 02,73 W
2733	FL13	49° 22,27 N	00° 02,30 W
2734	FL14	49° 22,25 N	00° 01,80 W
2735	FL15	49° 22,07 N	00° 01,31 W
2736	FL16	49° 22,06 N	00° 00,75 W
2738	VAS20	49° 22,36 N	00° 04,20 W
2739	VAS20	49° 23,57 N	00° 09,54 W
2740	VAS21	49° 23,52 N	00° 09,04 W
2741	VAS22	49° 23,34 N	00° 08,52 W
2742	VAS23	49° 23,20 N	00° 08,02 W
2743	FL43	49° 23,07 N	00° 07,50 W
2744	FL42	49° 22,99 N	00° 06,95 W
2745	FL41	49° 22,95 N	00° 06,54 W
2746	FL40	49° 22,76 N	00° 06,01 W
2747	FL39	49° 22,62 N	00° 05,62 W
2748	FL38	49° 22,55 N	00° 05,19 W
2749	FL37	49° 22,41 N	00° 04,62 W
2751	FL36	49° 22,31 N	00° 04,25 W
2752	FL35	49° 22,19 N	00° 03,88 W
2753	FL34	49° 22,12 N	00° 03,49 W
2754	FL33	49° 22,05 N	00° 03,10 W
2755	FL32	49° 21,95 N	00° 02,70 W
2756	FL31	49° 21,90 N	00° 02,27 W
2757	FL30	49° 21,81 N	00° 01,99 W
2758	FL29	49° 21,74 N	00° 01,57 W
2759	VAS113	49° 21,99 N	00° 01,99 W
2760	VAS114	49° 22,14 N	00° 02,50 W
2761	VAS115	49° 22,29 N	00° 02,99 W

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2762	VAS116	49° 22,39 N	00° 03,48 W
2764	SEW81	49° 21,65 N	00° 07,54 W
2765	SEW82	49° 21,54 N	00° 06,88 W
2766	SEW83	49° 21,42 N	00° 06,32 W
2767	SEW84	49° 21,34 N	00° 05,88 W
2768	SEW85	49° 21,20 N	00° 05,27 W
2769	SEW86	49° 21,10 N	00° 04,67 W
2770	SEW87	49° 20,99 N	00° 04,11 W
2772	SEW88	49° 20,81 N	00° 03,56 W
2773	SEW89	49° 20,76 N	00° 03,00 W
2774	SEW90	49° 20,46 N	00° 02,48 W
2776	SEW91	49° 20,45 N	00° 01,87 W
2777	SEW92	49° 20,31 N	00° 01,24 W
2778	SEW93	49° 20,26 N	00° 00,70 W
2779	SEW93	49° 20,24 N	00° 00,71 W
2780	SEW67	49° 20,73 N	00° 00,27 W
2781	SEW68	49° 20,92 N	00° 00,78 W
2783	SEW69	49° 21,01 N	00° 01,57 W
2784	SEW70	49° 21,15 N	00° 02,08 W
2786	SEW71	49° 21,26 N	00° 02,69 W
2787	SEW72	49° 21,43 N	00° 03,19 W
2788	SEW73	49° 21,52 N	00° 03,68 W
2789	SEW74	49° 21,67 N	00° 04,23 W
2790	SEW75	49° 21,77 N	00° 04,88 W
2791	SEW76	49° 21,96 N	00° 05,31 W
2792	SEW77	49° 22,02 N	00° 05,93 W
2793	SEW78	49° 22,19 N	00° 06,41 W
2794	SEW80	49° 22,44 N	00° 07,44 W
2795	TEMP30	49° 22,75 N	00° 09,00 W
2796	TEMP31	49° 22,92 N	00° 10,06 W
2797	TEMP27	49° 23,50 N	00° 11,02 W
2798	TEMP26	49° 23,52 N	00° 12,04 W
2799	TEMP24	49° 24,00 N	00° 13,05 W
2800	TEMP22	49° 24,00 N	00° 14,05 W
2801	TEMP21	49° 25,02 N	00° 14,02 W
2802	TEMP22	49° 26,02 N	00° 14,05 W
2805	TEMP14	49° 25,99 N	00° 03,07 W
2806	TEMP15	49° 25,46 N	00° 03,09 W
2808	TEMP16	49° 24,99 N	00° 03,08 W
2809	TEMP17	49° 24,49 N	00° 03,12 W
2810	TEMP18	49° 23,87 N	00° 03,22 W

**Campagne VASTEDEBA IV: 02 au 13 mai 2001 - Côtes de la Manche, Bennes Shipneck**

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2811	TEMP19	49° 23,65 N	00° 03,00 W
2812	SEW53	49° 23,21 N	00° 03,28 W
2813	VAS118	49° 22,62 N	00° 04,60 W
2814	VAS119	49° 22,75 N	00° 05,04 W
2815	VAS11	49° 21,87 N	00° 08,03 W
2816	VAS10	49° 21,97 N	00° 08,51 W
2817	VAS09	49° 22,09 N	00° 08,99 W
2818	VAS08	49° 22,20 N	00° 09,52 W
2819	TEMP11	49° 21,49 N	00° 10,98 W
2820	TEMP10	49° 21,00 N	00° 11,00 W
2821	TEMP09	49° 20,47 N	00° 10,99 W
2822	VAS01	49° 23,02 N	00° 12,71 W
2823	VAS02	49° 22,91 N	00° 12,42 W
2824	VAS03	49° 22,79 N	00° 11,99 W
2825	VAS04	49° 22,72 N	00° 11,46 W
2826	VAS05	49° 22,57 N	00° 10,84 W
2827	VAS06	49° 22,39 N	00° 10,45 W
2828	VAS07	49° 22,31 N	00° 09,97 W
2829	TEMP28	49° 23,97 N	00° 11,02 W
2830	TEMP29	49° 24,49 N	00° 11,04 W
2831	TEMP25	49° 24,47 N	00° 11,97 W
2832	TEMP23	49° 24,95 N	00° 12,98 W
2833	FL21BIS	49° 21,27 N	00° 02,38 E
2834	FL22	49° 20,96 N	00° 01,50 E
2835	FL23	49° 21,09 N	00° 01,00 E
2836	FL24	49° 21,20 N	00° 00,45 E
2837	FL24	49° 21,19 N	00° 00,48 E
2838	FL21	49° 21,45 N	00° 00,66 E
2839	FL20	49° 21,52 N	00° 01,16 E
2840	FL19	49° 21,69 N	00° 00,55 E
2841	FL25	49° 21,31 N	00° 00,04 E
2842	FL26	49° 21,42 N	00° 00,34 W
2843	TEMP02	49° 18,24 N	00° 12,04 W
2844	TEMP01	49° 18,49 N	00° 11,99 W
2845	TEMP03	49° 18,51 N	00° 11,00 W
2847	TEMP04	49° 18,31 N	00° 10,94 W
2848	TEMP06	49° 18,26 N	00° 09,97 W
2849	TEMP05	49° 18,51 N	00° 10,01 W
2850	TEMP08	49° 18,24 N	00° 08,96 W
2851	TEMP07	49° 18,51 N	00° 09,04 W
2853	TEMP13	49° 20,51 N	00° 09,09 W

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2854	FL27	49° 21,52 N	00° 00,77 W
2855	FL28	49° 21,64 N	00° 01,19 W
2856	VAS111	49° 21,79 N	00° 01,01 W
2857	VAS110	49° 21,62 N	00° 00,46 W
2858	FL18	49° 21,80 N	00° 00,17 W
2859	FL17	49° 21,94 N	00° 00,36 W
2860	FL16	49° 22,06 N	00° 00,74 W
2861	VAS112	49° 21,91 N	00° 01,52 W

**Campagne VASTEDEBA IV: 02 au 13 mai 2001 - Reineck**

Numéro	Site	Latitude	Longitude
2750	FL37	49° 22,37 N	00° 04,65 W
2763	VAS116	49° 22,35 N	00° 03,45 W
2771	SEW87	49° 20,98 N	00° 04,14 W
2775	SEW90	49° 20,62 N	00° 02,50 W
2782	SEW68	49° 20,89 N	00° 00,81 W
2785	SEW70	49° 21,16 N	00° 02,11 W
2803	Rade Carosse	49° 27,17 N	00° 00,98 E
2804	Rade Carosse	49° 27,11 N	00° 00,85 E
2807	TEMP15	49° 25,39 N	00° 03,18 W
2846	TEMP03	49° 18,49 N	00° 10,01 W
2852	TEMP07	49° 18,49 N	00° 09,11 W
2862	VAS112	49° 21,89 N	00° 01,56 W

## **ANNEXE 2**

---

# **LE SONAR A BALAYAGE LATERAL & CALCUL DES PARAMETRES GRANULOMETRIQUES**

## **Le sonar à balayage latéral**

---

### **Positionnement**

Le positionnement des profils de sonar à balayage latéral a été réalisé à partir d'un système DGPS Trimble (précision métrique) installé directement sur le toit des navires. Pour le traitement des données, les points de positionnement ont été replacés sur des fonds de carte de taille A0 à l'aide du logiciel Pathfinder.

### **Généralités sur le sonar à balayage latéral**

Cet outil acoustique permet de caractériser la nature des fonds et les figures sédimentaires associées, ou encore les ouvrages sous-marins (e.g. pipe-lines, épaves, mines). Le système est composé d'un enregistreur analogique, d'un câble et d'un poisson (*tow vehicle*, *fig. A2-1*). Le poisson remorqué à l'arrière d'un bateau émet un signal ultrasonore de très courte durée d'impulsion (100 à 500 kHz) grâce à deux transducteurs situés dans les flancs du poisson qui jouent le rôle à la fois d'émetteurs et de récepteurs. Le signal propagé dans l'eau est rétrodiffusé au contact du fond puis réceptionné en retour par les transducteurs. Le signal est ensuite renvoyé à l'enregistreur analogique où il est transcrit sur papier thermique en nuance de gris dont les variations sont fonction du coefficient de rétrodiffusion du fond (i.e. nature du fond) et de l'angle d'incidence du front d'onde (i.e. géométrie du fond). A l'aplomb du poisson, le signal n'est pas récupéré; il se forme systématiquement une zone non couverte dite zone d'ombre (*fig. A2-1*).

### **Acquisition des données**

Le matériel ayant servi au cours des deux campagnes de prospection est celui du département d'Instrumentation Scientifique de l'EPSHOM. Le système utilisé est composé d'un poisson EDGERTON 272 T émettant des signaux à 100 et 500 kHz et d'un enregistreur analogique associé EDGERTON 260 TH à correction d'image (élimination automatique des déformations). Les faibles profondeurs de notre secteur d'étude nous ont contraint à travailler avec une altitude du poisson par rapport au fond comprise entre 5 et 10 m, la portée d'acquisition étant variable en fonction de cette altitude (75 à 150 m). Dans ces conditions, la résolution du système autorise une détection de l'ensemble des corps sédimentaires

pluri-centimétriques (e.g. casiers à crustacés, *fig. III-20, p. 113*) dont les caractéristiques données par le constructeur sont les suivantes:

Distance du poisson (m) / fond	Résolution transversale (m)	Résolution longitudinale (m)
5	0,3	0,1
30	0,1	0,5
50	0,1	1

La position du navire lors des levés de sonar a été enregistrée par DGPS et reportée sous la forme de top horaire toutes les 30 secondes sur l'enregistrement papier (papier électro-sensible en 16 niveaux de gris et 2048 pixels/lignes). Une correction entre l'antenne de réception GPS et la position réelle du poisson située en moyenne entre 10-40 mètres derrière le bateau est nécessaire lors de l'interprétation.

### Traitement des données et mise en forme

Les données étant imprimées sur papier thermique, le dépouillement des sonogrammes a été réalisé manuellement sur un fond de carte grand format (A0) en utilisant les positions DGPS.

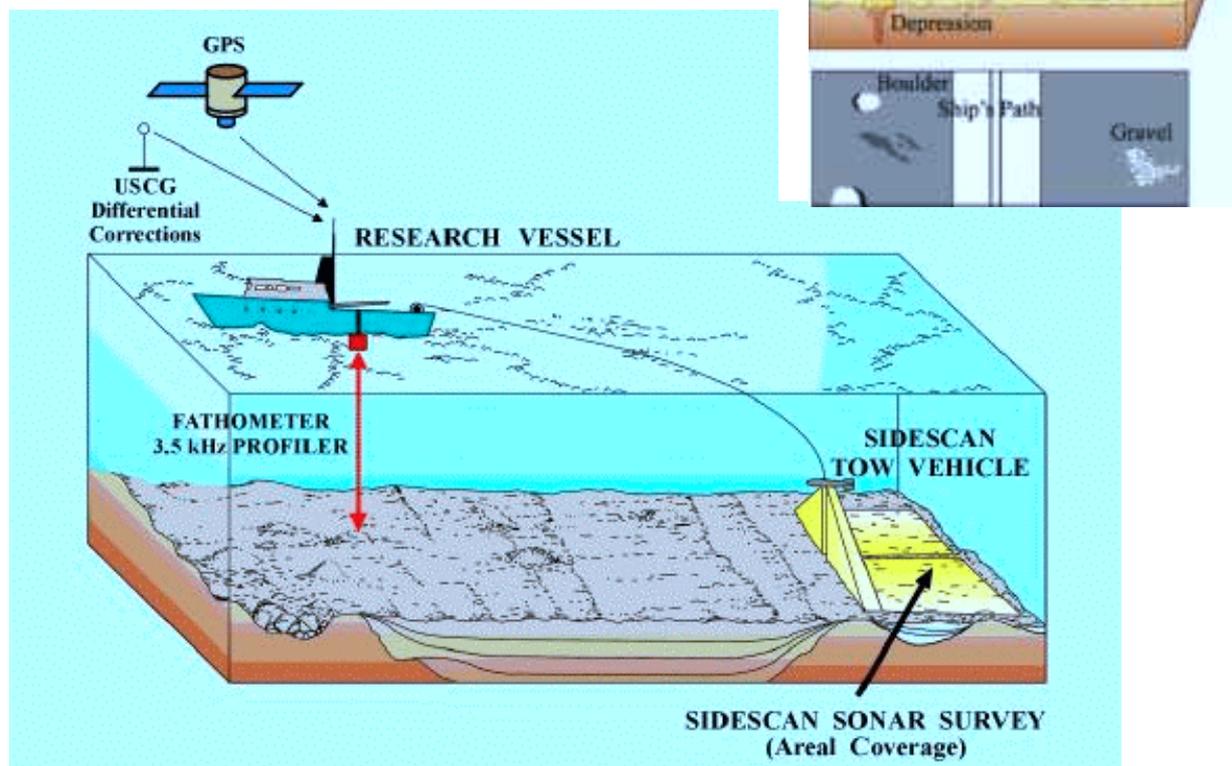


Figure A2-1. Schéma de mise en œuvre et de fonctionnement du sonar à balayage latéral (<http://pubs.usgs.gov>).

## Calcul des paramètres granulométriques sur les données brutes par la méthode des moments statistiques (McManus, 1988)

### Principe

Les données granulométriques ont été traitées avec le logiciel intégré au microgranulomètre LS230. Toutefois, après avoir essayé de valider le calcul des paramètres granulométriques par ce logiciel, il s'est avéré que des erreurs de formulation s'étaient glissées dans le calcul des indices de classement et de l'asymétrie. De ce fait, ils ont donc tous été recalculés à partir de la méthode des moments statistiques décrits par McManus (1988). Contrairement aux méthodes empiriques traditionnelles (in Chamley, 1986), ces paramètres ont une définition mathématique. On appelle moment d'ordre k par rapport à la valeur  $x_0$  la quantité:

$$m_k = \frac{1}{N} \sum n_i \times (x_i - x_0)^k \quad (\text{éq. 1})$$

C'est la moyenne arithmétique des puissances k-ièmes des différences ( $x_i - x_0$ )

$$x_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n n_i \times x_i \quad N = \sum n_i$$

Les paramètres granulométriques peuvent être exprimés en unités métriques (arithmétiques) ou phi -  $\phi$  (logarithmiques). L'unité phi ( $\phi$ ) est celle utilisée dans le protocole d'obtention des vecteurs tendances de transport de la méthode de Gao et Collins.

$$\phi = -\log_2 d \quad \text{avec } d \text{ diamètre apparent en mm}$$

unité $\phi$	-2	-1	0	1	2	3
mm	4	2	1	1/2	1/4	1/8

Correspondance entre unités  $\phi$  et mm

### La moyenne: $\mu$

Le grain moyen ( $\mu$ ) correspond au premier des moments statistiques et exprime la taille moyenne du sédiment.

$\mu < 1\phi$	ou	$\mu > 500 \mu\text{m}$	Sable grossier, gravier
$1\phi < \mu < 2\phi$		$500 > \mu > 250 \mu\text{m}$	Sable moyen
$2\phi < \mu < 3\phi$		$250 > \mu > 125 \mu\text{m}$	Sable fin
$3\phi < \mu < 4\phi$		$125 > \mu > 63 \mu\text{m}$	Sable très fin
$\mu > 4\phi$		$\mu < 63 \mu\text{m}$	Silt et argile

$$\bar{x}_g = \exp \frac{\sum n_i \times \log x_i}{\sum n_i} = \mu_1 \quad \text{moment d'ordre 1} \quad (\text{éq. 2})$$

$\bar{x}_g$ : moyenne géométrique granulométrique

$n_i$ : pourcentage de la fraction  $n_i$  dans l'échantillon total

$x_i$ : taille des particules

### Le classement, sorting ou déviation standard: $\sigma$

Le classement (*sorting*), moment d'ordre 2, correspond à un écart-type et précise la dispersion de la courbe de fréquence granulométrique. Il tient compte de l'écart entre le diamètre des particules et le grain moyen de l'échantillon. Plus cet écart sera faible (tend vers 0), et mieux sera classé l'échantillon.

$$(\text{éq. 3}) \quad \sigma = \exp \sqrt{\frac{\sum \left[ n_i (\log x_i - \log \bar{x}_g)^2 \right]}{\sum n_i}} = \mu_2^{1/2} \quad \text{moment d'ordre 2}$$

$\bar{x}_g$ : moyenne géométrique granulométrique

$n_i$ : pourcentage de la fraction  $n_i$  dans l'échantillon total

$x_i$ : taille des particules

$\sigma < 0,35\phi$	ou* (0,35 $\phi$ )	Très bien classé
$0,35\phi < \sigma < 0,50\phi$	(0,50 $\phi$ )	Bien classé
$0,50\phi < \sigma < 0,71\phi$	(0,80 $\phi$ )	Assez bien classé
$0,71\phi < \sigma < 1\phi$	(1,40 $\phi$ )	Assez peu classé
$1\phi < \sigma < 2\phi$	(2 $\phi$ )	Peu classé
$2\phi < \sigma < 4\phi$	(2,6 $\phi$ )	Très peu classé
$\sigma > 4\phi$		Extrêmement peu classé

(\* d'après Friedman, 1967)

### L'asymétrie, skewness ou coefficient de dissymétrie: $Sk$

Troisième moment statistique, c'est un paramètre de forme de la courbe de fréquence qui caractérise la polarité d'une courbe granulométrique. Il traduit le degré de symétrie de la courbe de distribution par rapport à l'abscisse passant par son centre de gravité. Lorsque ce

coefficient est nul, il indique une parfaite symétrie du sédiment, c'est à dire qu'il y a autant de particules fines que grossières. Une valeur négative de ce paramètre correspond à une dissymétrie de la courbe liée à une prépondérance des fines, et une valeur positive à une prépondérance des fractions grossières.

$$Sk = \frac{\sum \left[ n_i \left( \log x_{gi} - \overline{\log x_g} \right)^3 \right]}{\exp(\sigma^3) \times \sum n_i} = \frac{\mu_3}{(\mu_2)^{3/2}} = \frac{\mu_3}{\sigma_3} \quad \text{moment d'ordre 3} \quad (\text{éq. 4})$$

$\bar{x}_g$ : moyenne géométrique granulométrique

$\mu_2$ : moment d'ordre 2

$\mu_3$ : moment d'ordre 3

$\sigma$ : sorting

$n_i$ : pourcentages de la fraction  $n_i$  dans l'échantillon total

$x_i$ : tailles des particules

$-1\phi < Sk_i < -0,3\phi$	Très asymétrique vers les grossiers
$-0,3\phi < Sk_i < -0,1\phi$	Asymétrique vers les grossiers
$-0,1\phi < Sk_i < 0,1\phi$	Presque symétrique
$0,1\phi < Sk_i < 0,3\phi$	Asymétrique vers les fins
$0,3\phi < Sk_i < 1\phi$	Très asymétrique vers les fins

d'après Folk et Ward, 1957

## **ANNEXE 3**

---

# **FONDEMENTS ET PRINCIPE DE LA METHODE DE GAO ET COLLINS**

## Fondements et principe de la méthode de Gao et Collins

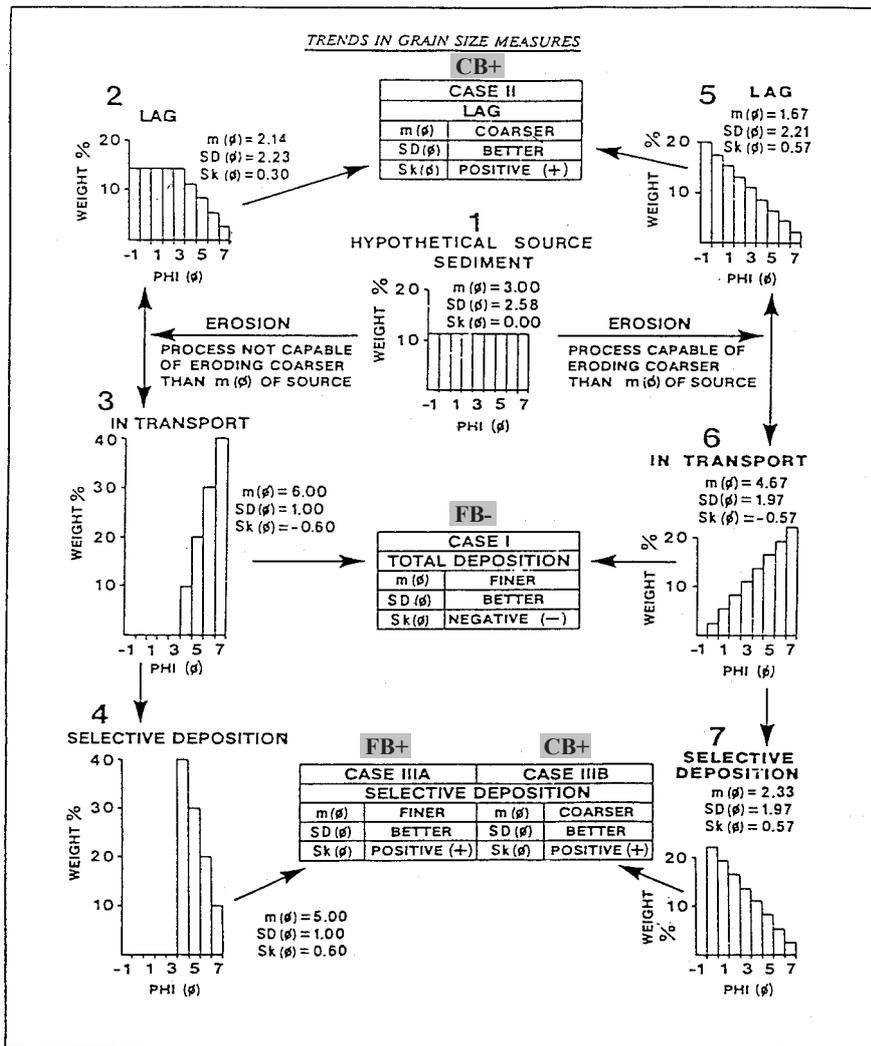
---

### 1. Approche intuitive de Mc Laren (1981) et amélioration de la méthode par Mc Laren et Bowles (1985)

Selon Mc Laren (1981), la distribution granulométrique d'un sédiment varie au cours de son transport en fonction des processus hydrodynamiques du milieu (érosion, traction, saltation, suspension, dépôt sélectif ou partiel) et des caractéristiques granulométriques du sédiment source (*fig. A3-1*). Ces variations peuvent être décrites par l'évolution des trois paramètres granulométriques caractérisant un sédiment: la moyenne ( $\mu$ ), le classement ( $\sigma$ ) et l'asymétrie ( $Sk$ ) (*cf. annexe 2* pour la définition des paramètres). Trois cas d'évolution peuvent être rencontrés (*fig. A3-1*):

- 1/ le sédiment érodé à partir de la source, transporté puis complètement déposé, est finalement plus fin, mieux classé et d'asymétrie plus négative que le sédiment originel (cas I – FB-, *fig. A3-1*),
- 2/ après érosion, le sédiment source se caractérise par un sédiment résiduel qui est plus grossier, mieux trié et d'asymétrie plus positive (cas II – CB+, *fig. A3-1*),
- 3/ le sédiment transporté subit un dépôt sélectif du fait d'une diminution de l'énergie dans la direction du transport: le dépôt est mieux trié, d'asymétrie plus positive et, selon l'énergie globale du processus d'érosion, soit plus fin ("basse énergie", cas IIIa – FB+, *fig. A3-1*) soit plus grossier ("haute énergie", cas IIIb - CB+, *fig. A3-1*).

Ainsi, en comparant deux échantillons, il est possible d'établir si une filiation existe ou non entre le sédiment source et le sédiment fils, permettant alors de définir un sens de transport sédimentaire. En 1985, Mc Laren et Bowles montrent de manière empirique, à partir de mesures expérimentales en canal hydraulique, que l'asymétrie d'un sédiment devenant plus fin est systématiquement négative, élimant ainsi la possibilité d'apparition du cas IIIa (FB+). De ce fait, dans les conditions naturelles, deux cas seulement sont réellement significatifs d'un transport sédimentaire: CB+ (cas IIIb) et FB- (cas IIIa) avec un sédiment systématiquement mieux trié à l'issue du transport ("B").



**Figure A3-1.** Evolution des distributions granulométriques d'un sédiment source érodé, transporté puis déposé. Les trois cas présentés illustrent les changements de la moyenne ( $m$ ), du classement ( $SD$ ) et de l'asymétrie ( $Sk$ ) par rapport au sédiment source donné ( $n^{\circ}1$ ). Les valeurs des paramètres sont exprimées en unité phi ( $\Phi$ ) (Mc Laren, 1981). *Remarque:* le cas II (CB+) n'est pas représentatif d'un transport et correspond au sédiment de la source qui reste en place après érosion.

Mc Laren et Bowles (1985) montrent également que la relation entre la vitesse des courants et l'initiation du mouvement des particules les plus petites du sédiment source ne constitue pas une fonction continue (dite fonction de transfert<sup>1</sup>): le cas CB+ correspond à un contraste de haute énergie tandis que le cas FB- illustre un contraste de basse énergie (fig. A3-2):

Forte énergie (passage de  $t_D$  à  $t_C$ , fig. A3-2):

$$\text{CAS III-1: } \mu_1 \geq \mu_2, \sigma_1 \geq \sigma_2 \text{ et } Sk_1 \leq Sk_2 \text{ (en } \Phi)$$

Intitulé: CB + (Coarser, Better sorted, more positively skewed)

Le dépôt résultant du transport est plus grossier ( $\mu_1 \geq \mu_2$ ), mieux classé ( $\sigma_1 \geq \sigma_2$ ) et s'enrichit en particules fines ( $Sk_1 \leq Sk_2$ )

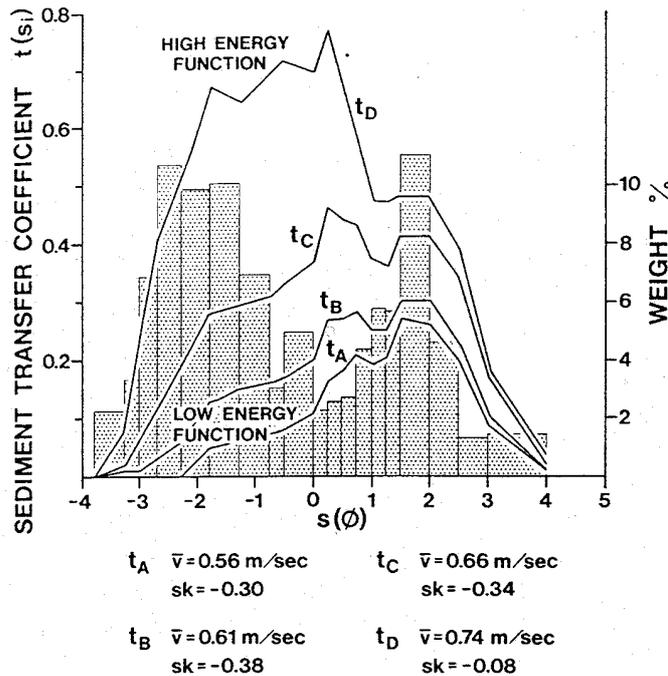
<sup>1</sup> La fonction de transfert  $X(s)$  définit la probabilité pour qu'un grain d'une classe granulométrique donnée soit érodé et transporté (Mc Laren & Bowles, 1985).

Faible énergie (passage de  $t_B$  à  $t_A$ , fig. A3-2):

CAS III-2:  $\mu_1 \leq \mu_2$ ,  $\sigma_1 \geq \sigma_2$  et  $Sk_1 \geq Sk_2$  (en  $\Phi$ )

Intitulé: FB - (Finer, Better sorted, more negatively skewed)

Le dépôt résultant du transport est plus fin ( $\mu_1 \leq \mu_2$ ), mieux classé ( $\sigma_1 \geq \sigma_2$ ) et s'enrichit en particules grossières ( $Sk_1 \geq Sk_2$ ).



**Figure A3-2.** Distributions granulométriques du sédiment source et courbes de fonction de transfert résultantes sous différents régimes hydrauliques. Ces mesures sont réalisées sur des sédiments bimodaux de moyennes granulométriques comprises entre  $62 \mu\text{m}$  ( $4 \Phi$ ) et  $95 \text{mm}$  ( $-3,25 \Phi$ ) (Mc Laren & Bowles, 1985).

Dans cette analyse portant sur des déplacements unidimensionnels, il est impossible de distinguer entre 2 sites les cas de transport réel des cas où la possibilité de transport (CB+ et FB-) est liée à la distribution granulométrique aléatoire de l'environnement, appelée "bruit de fond" (*noise*). Pour pallier ce problème, un test statistique, le Z-test (Spiegel, 1961), est préconisé par les auteurs (Mc Laren & Bowles, 1985) afin de préciser les transports significatifs.

## 2. Approche de Gao et Collins (1991; 1992; Gao *et al.*, 1994)

En se basant sur les résultats de Mc Laren et Bowles (1985) obtenus en canal hydraulique, Gao et Collins (1991; 1992; 1994a) ont généralisé la méthode dite de Mc Laren pour l'étendre à des domaines ouverts comme le milieu marin, en incorporant une technique d'analyse en 2 dimensions de l'environnement sédimentaire. Pour une grille régulière de prélèvements, ils comparent les valeurs obtenues à chaque nœud avec celles des sites voisins immédiats qui se situent dans l'intervalle d'échantillonnage maximal entre 2 points, défini comme étant la distance critique (Dcr). Il est alors possible de définir entre deux échantillons sédimentaires un sens de transport privilégié sur le fond.

Sur le Kwinte bank (Sud de la mer du Nord), Gao *et al.* (1994) ont comparé les résultats des vecteurs calculés pour chaque cas avec les sens de transit déduits de l'observation des figures sédimentaires au sonar à balayage latéral. Ainsi, ils calculent le pourcentage exprimant la corrélation entre les directions calculées et celles directement observées, dans la limite d'une divergence d'orientation inférieure à 45°. En conséquence, les cas les plus représentatifs des transports réels sont CB+ (30%) et FB- (27%), en accord avec les travaux de Mc Laren et Bowles (1985). Mais, c'est le cas combiné CB+/FB- qui présente la meilleure corrélation, 43% avec les observations. En fait, ce dernier cas permet de considérer les transits résiduels qui s'effectuent seulement avec une diminution du sorting dans le sens du transport quelle que soit l'énergie du milieu (forte ou faible), évolution toujours vérifiée (*fig. A4-1*) dans le cas d'un transport d'après Mc Laren (1981).

La procédure de traitement en coordonnées bidimensionnelles des données, dite méthode de Gao et Collins (1991; 1994a), se décompose en 3 étapes principales (*fig. A3-3*), permettant d'aboutir à des "vecteurs" de transport résiduel:

### **1<sup>er</sup> étape: vecteurs unitaires de tendances (trends vectors)**

Les paramètres d'un échantillon sont comparés avec ceux de chaque point environnant, 2 à 2, dans un rayon inférieur ou égal à une distance critique d'échantillonnage (Dcr, distance maximum séparant deux points voisins). Un vecteur de norme unitaire appelé vecteur de tendance  $\vec{r}(x,y)$  est dessiné à chaque fois que l'un des 3 cas choisis (III-1 CB+ , III-2 FB- ou III-1/III-2 CB+/FB-) est observé entre 2 points voisins (*fig. A3-3*); un site peut donc être caractérisé par plusieurs tendances de transport: il peut être source pour plusieurs sites voisins. Le module de ces vecteurs tendances est arbitraire puisqu'il n'est pas proportionnel à l'évolution des paramètres considérés (i.e. il n'est pas représentatif de l'intensité du transport à cette étape de la méthode).

### **2<sup>ème</sup> étape: sommation des vecteurs (summed trend vector)**

Lorsque des points d'échantillonnage génèrent plusieurs vecteurs en direction de différents points voisins à l'intérieur de la Dcr, on opère une sommation des vecteurs tendances en chacun des points pour obtenir des vecteurs sommes dits vecteurs résultants (*fig. A3-3*).

$$\vec{R}(x, y) = \sum_1^n \vec{r}(x, y)_i \quad (\text{éq. 5})$$

n: nombre de vecteurs tendances définis pour chaque point d'échantillonnage

$\vec{r}(x,y)$ : vecteur tendance

$\vec{R}(x,y)$ : vecteur résultant

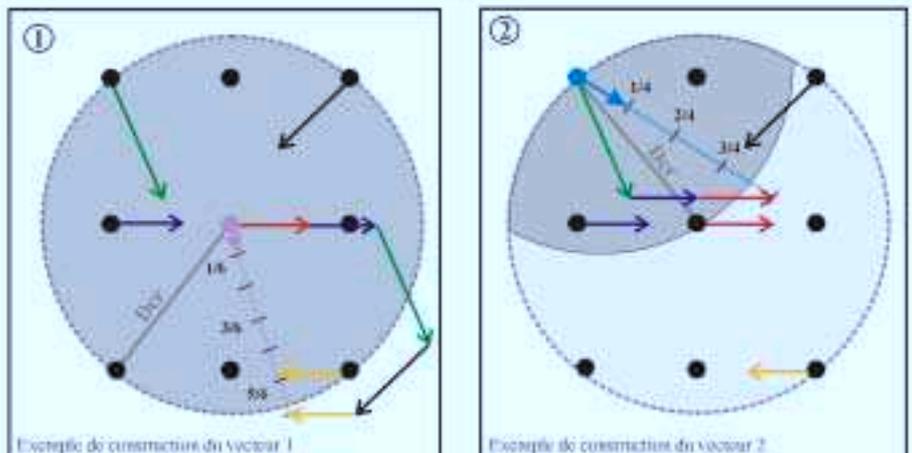
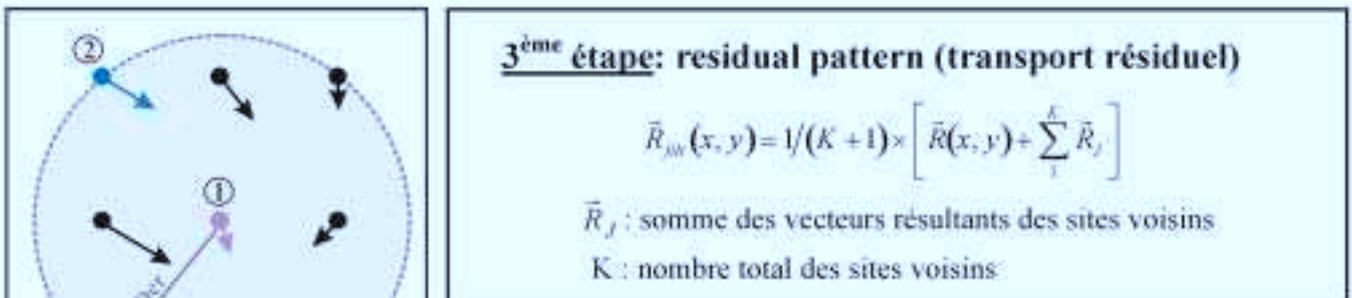
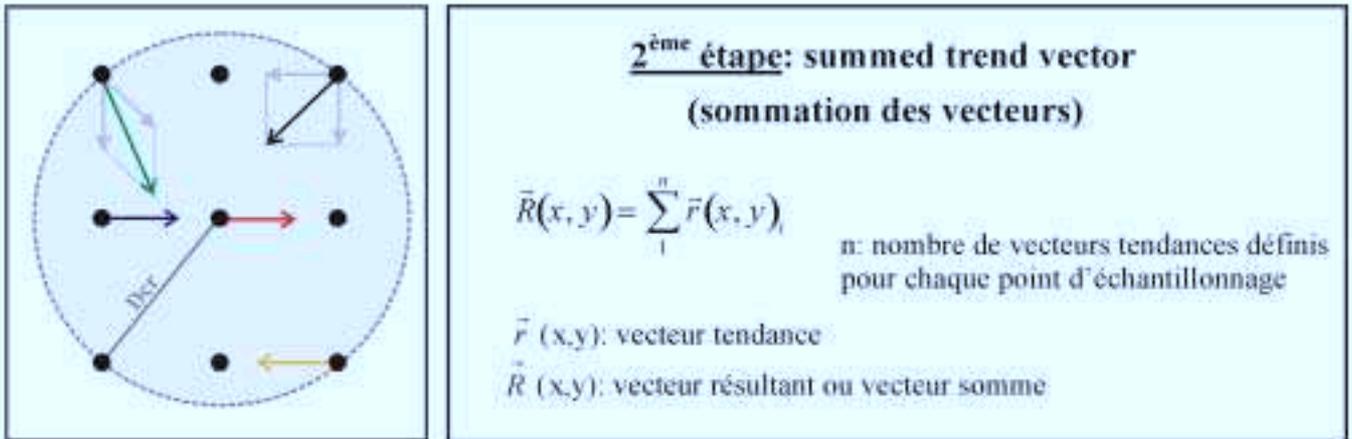
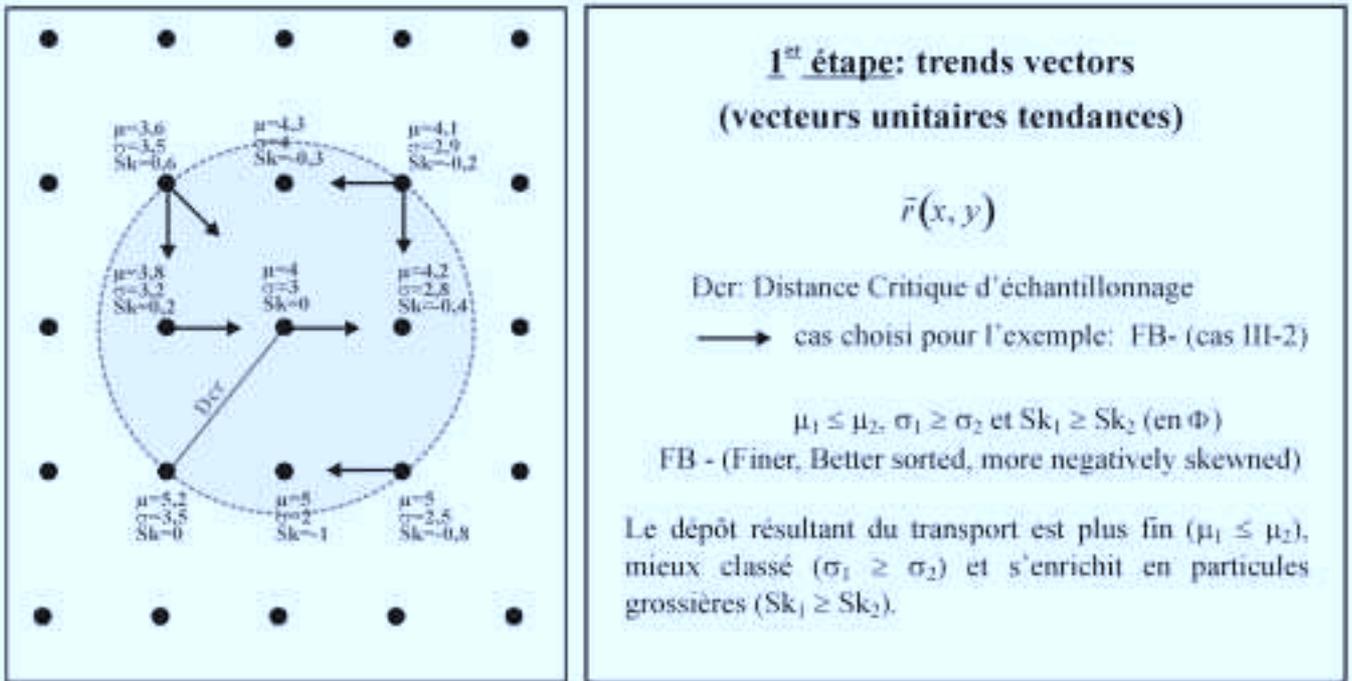


Figure A3-3. Schéma explicatif de la procédure de traitement bidimensionnel des paramètres granulométriques par la méthode de Gao et Collins (Gao & Collins, 1991, 1992).

### **3<sup>ème</sup> étape: transport résiduel (residual pattern)**

Enfin, pour éliminer au maximum les vecteurs incohérents (appelé "bruit"), les vecteurs sommes de chaque point sont additionnés aux vecteurs des points voisins, situés à une distance égale ou inférieure à la Dcr. Chaque point se voit alors affecté d'un vecteur "résiduel" de transport (fig. A3-3). Les vecteurs de transport sont obtenus sur la base de l'équation suivante:

$$\vec{R}_{filt}(x, y) = 1/(K + 1) \times \left[ \vec{R}(x, y) + \sum_1^K \vec{R}_J \right] \quad (\text{éq. 6})$$

$\vec{R}_J$  : somme des vecteurs résultants des sites voisins

K : nombre total des sites voisins

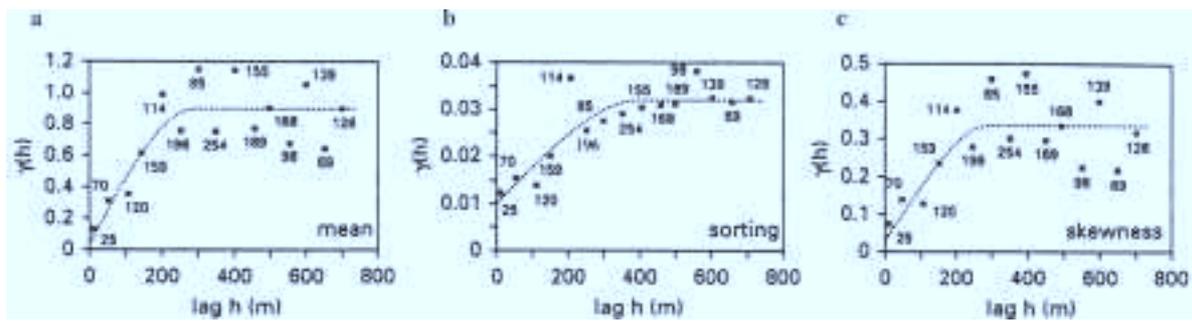
Ces vecteurs ainsi calculés indiquent le sens du transport résiduel mais l'information sur l'importance du volume du transport doit être abordée avec prudence (Gao & Collins, 1992, 1994b; Gao *et al.*, 1994; Le Roux, 1994a, b; Carrigny & Sanchez, 1999).

### **3. Distance critique**

Gao et Collins (1992) ont proposé de ne comparer que les sites séparés par une distance égale ou inférieure à l'intervalle maximum qui sépare deux sites voisins (distance critique, Dcr). Toutefois, Ehrhold et Auffret (1996) et Ehrhold (1999) ont montré de manière empirique que, pour la Baie du Mont-Saint-Michel, une distance de calcul (Dcl) supérieure de 9 à 49% par rapport à la Dcr donnait de meilleurs résultats. Il est donc préférable d'utiliser une Dcl adaptée à l'environnement étudié par le choix d'une maille de grille adaptée. En effet, si l'on compare deux sites trop éloignés, ils peuvent se trouver dans des conditions hydrodynamiques différentes. Asselman (1996; 1999) propose ainsi de déterminer la dépendance spatiale de la distribution des sédiments par l'utilisation d'une analyse géostatistique de type semi-variogramme. Cette approche nouvelle de la Dcl permet de préciser de manière plus rigoureuse cette distance qui est le plus souvent déterminée par "tâtonnements". Les ruptures de pente dans l'accroissement de la fonction semi-variogramme sont des indicateurs d'un changement dans la structure spatiale de la variable étudiée (Asselman, 1999), par exemple la moyenne granulométrique (fig. A3-4a). Cette fonction variogramme peut présenter plusieurs ruptures, qui peuvent être interprétées comme autant de distances indiquant les échelles majeures du transit sédimentaire par charriage (Poizot *et al.*, soumis), permettant de proposer une nouvelle approche dans la détermination de la Dcl par rapport à la simple Dcr proposée par Gao et Collins.

Fonction variogramme: 
$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Zn_i(x_i) - Zn_i(x_i + h)]^2 \quad (\text{éq. 7})$$

avec  $n$  le nombre de points expérimentaux séparés par la distance  $h$

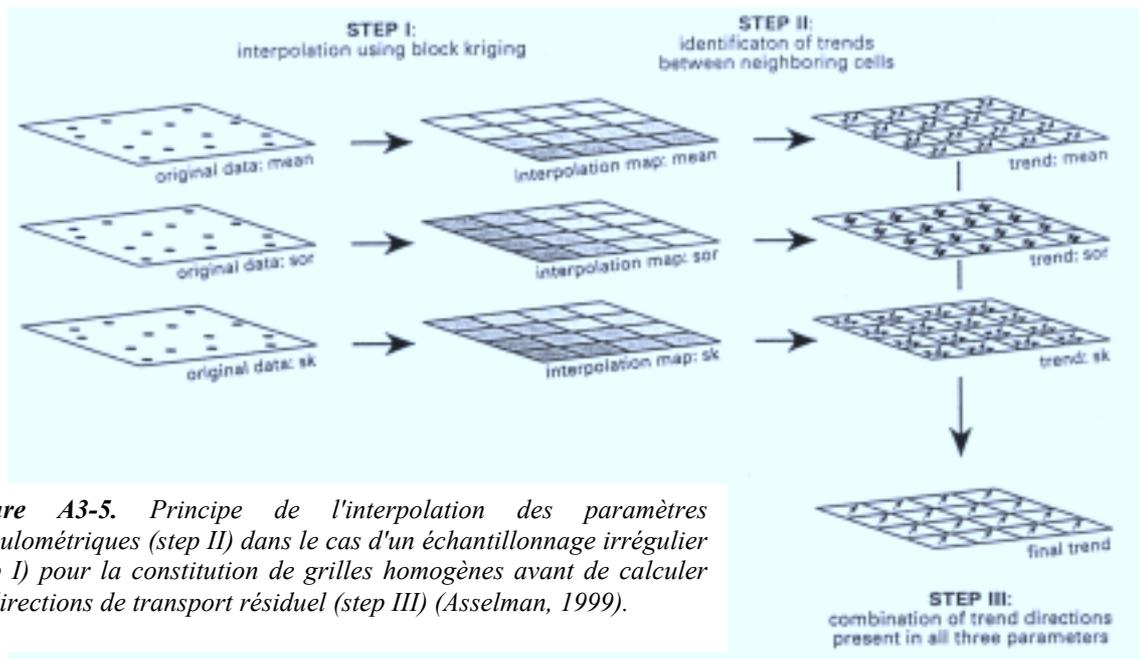


**Figure A3-4.** Semi-variogrammes des paramètres granulométriques. a) moyenne, b) sorting, c) skewness (Asselman, 1999).

#### 4. Grille d'échantillonnage

Les caractéristiques de la grille d'échantillonnage vont fortement influencer les résultats du modèle, ce qui en fait l'un des points le plus controversé de la méthode. En effet, puisque les vecteurs tendances ont une même norme (1<sup>ère</sup> étape de construction, *fig. A3-3*), il en résulte que le module des vecteurs "sommés" obtenu sur une grille d'échantillonnage irrégulière est influencé par le nombre de points voisins (Le Roux, 1994a, b). Cependant, si la grille d'échantillonnage est régulière, le nombre de sites voisins devient alors le même pour chaque point et il est donc possible d'introduire la notion d'intensité de transport pour les vecteurs somméés sans pouvoir néanmoins quantifier les volumes (Gao & Collins, 1994b; Gao *et al.*, 1994; Le Roux, 1994a).

Selon McLaren et Bowles (1985), il est nécessaire de disposer d'au moins 9 échantillons pour évaluer correctement une direction de transit sédimentaire. Dans l'analyse bi-dimensionnelle de Gao et Collins, les échantillons situés en bordure doivent être écartés de l'interprétation des sens de transport résiduel puisqu'ils ne sont pas entourés du même nombre de points voisins, ce qui génère un effet de bord (Gao & Collins, 1994b; Le Bot, 2001). D'une manière générale, la taille de la maille d'échantillonnage doit être inférieure à l'objet sédimentaire étudié (e.g. banc sableux), mais suffisamment grande pour refléter les tendances granulométriques résultant du transport résiduel sur le fond. Quelle est alors la solution à adopter pour obtenir des vecteurs tendances corrects lorsque la grille comporte de nombreux points manquants ? Ce sont les travaux d'Asselman (1996; 1999) et de Poizot *et al.* (soumis) qui permettent d'améliorer ce point de la méthode en proposant une interpolation pour chaque point manquant d'une valeur de  $\mu$ ,  $\sigma$  et  $Sk$  selon les méthodes actuelles des systèmes d'information géographique (SIG, e.g. type "block kriging", *fig. A3-5*).



**Figure A3-5.** Principe de l'interpolation des paramètres granulométriques (step II) dans le cas d'un échantillonnage irrégulier (step I) pour la constitution de grilles homogènes avant de calculer les directions de transport résiduel (step III) (Asselman, 1999).

## 5. Echelles de temps

Les vecteurs calculés par la méthode sont dépendants des caractéristiques granulométriques des sédiments sur l'épaisseur échantillonnée. Ainsi, les sens de transport calculés peuvent être liés à la mise en place d'un sédiment lors d'un épisode événementiel de type crue, caractériser un cycle de marée, ou au contraire couvrir des échelles de temps de plusieurs années en fonction des taux de sédimentation. Dans les différents travaux publiés, cette approche de la notion de temps associée aux vecteurs calculés est peu abordée, où les vecteurs de transport dits "résiduels" expriment des sens de transit "moyen" sans aucune précision de l'échelle de temps associée. Pourtant, et particulièrement en régime de marée, le transport sédimentaire s'établit dès que le seuil critique d'érosion du sédiment est atteint; lors des cycles de mortes-eaux (faibles courants de marée), ce seuil n'est pas systématiquement dépassé. D'une manière générale, les caractéristiques des vecteurs obtenus par la méthode de Gao et Collins sont associés à l'enregistrement à moyen (annuel) ou long (pluri-annuel) termes des transports sédimentaires (e.g. Wu & Shan, 1999; Le Bot, 2001; Le Bot *et al.*, 2001).

## 6. Conclusion sur la méthode

La méthode de Gao et Collins permet de proposer rapidement des sens de transits sédimentaires résiduels sur le fond. Toutefois, ces sens de transports calculés doivent être systématiquement confrontés avec des mesures directes (e.g. sonar, traceurs, vidéo sous-marine). Les divergences entre les directions calculées et les transports réels peuvent néanmoins être importantes, expliquées par (i) un pas d'échantillonnage mal adapté par rapport aux structures sédimentaires étudiées (Lanckness *et al.*, 1992; Asselman, 1999;

Vanwesenbeeck & Lanckneus, 2000), (ii) la multiplicité des sources d'apports sédimentaires (Masselink, 1992) ou encore (iii) l'interférence des processus hydrodynamiques dans les mouvements sédimentaires (Vanwesenbeeck & Lanckneus, 2000).

### Bibliographie de l'annexe 3

- Asselman, N.E.M.** (1996). A GIS-based method for the identification of sediment transport paths from grain size trends. <http://www.geog.uu.nl/pcraster/exmod/grainsize/grainsize.html>.
- Asselman, N.E.M.** (1999). Grain-size trends used to assess the effective discharge for floodplain sedimentation, river Waal, The Netherlands. *Journal of Sedimentary Research* 69 (1), 51-61.
- Carrigny, J.D. & Sanchez, A.** (1999). Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly of discharge loss. *Marine Geology* 158, 125-145.
- Ehrhold, A.** (1999). Dynamique de comblement d'un bassin sédimentaire soumis à un régime mégatidal: exemple de la Baie du Mont-Saint-Michel. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Caen, Caen*, 294 p.
- Ehrhold, A. & Auffret, J.-P.** (1996). Approche bi-dimensionnelle des transports sédimentaires à partir des variations granulométriques des sédiments superficiels: exemple de la partie occidentale de la Baie du Mont-Saint-Michel. *IV<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier*, Dinard, 277-284.
- Gao, S. & Collins, M.** (1991). A critique of the "Mc Laren method" for defining sediment transport paths. *Journal of Sedimentary Petrology* 61, 143-146.
- Gao, S. & Collins, M.** (1992). Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". *Sedimentary geology* 80, 47-60.
- Gao, S. & Collins, M.** (1994a). Analysis of grain-size trends for defining sediment transport pathways in marine environment. *Journal of Coastal Research* 10 (1), 70-78.
- Gao, S. & Collins, M.** (1994b). Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"-reply. *Sedimentary geology* 90, 157-159.
- Gao, S., Collins, M., Lanckneus, J., De Moor, G. & Van Lanckner, V.** (1994). Grain size trends associated with net transport sediment patterns: an example from the Belgian continental shelf. *Marine Geology* 121, 171-185.
- Lanckneus, J., De Moor, G., De Schaepmeester, G., Meyus, I. & Spiers, V.** (1992). Residual sediment transport directions on a tidal sand bank. *Bulletin de la Société Belge d'Etudes Géographiques* 2, 425-446.
- Le Bot, S.** (2001). Morphodynamique de dunes sous-marines sous influence des marées et des tempêtes. Processus hydro-sédimentaires et enregistrement. Exemple du Pas-de-Calais. *Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Lille I*, 272 p.
- Le Bot, S., Trentesaux, A. & Ehrhold, A.** (2001). Contrôle exercé par les bancs sableux sur la morphodynamique des dunes. Apports pour la modélisation du transport sédimentaire résiduel par la méthode de Gao et Collins. *8<sup>ème</sup> Congrès Français de Sédimentologie - Livre des résumés*. ASF, Paris, Orléans, 211-212.
- Le Roux, J.P.** (1994a). An alternative approach to the identification of net transport paths based on grain-size trends. *Sedimentary Geology* 94, 97-107.
- Le Roux, J.P.** (1994b). Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". *Sedimentary Geology* 90, 153-156.
- Masselink, G.** (1992). Longshore variation of grainsize distribution along the coast of the Rhône Delta, Southern France: a test of "McLaren Model". *Journal of Coastal Research* 8 (2), 286-291.

- Mc Laren, P.** (1981). An interpretation of trends in grain-size measure. *Journal of Sedimentary Petrology* 51, 611-624.
- Mc Laren, P. & Bowles, D.** (1985). The effects of sediment transport on grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology* 55, 457-470.
- Poizot, E., Thomas, M., Méar, Y. & Garnaud, S.** (soumis). GIS Based Grain Size Trend Analysis Of The South Eastern Bay Of Seine, France. *Journal of Coastal Research*.
- Spiegel, M.R.** (1961). Theory and problems of statistics: schaum's outline series. *McGraw-Hill Book Co.*, New York, 359 p.
- Vanwesenbeeck, V. & Lanckneus, J.** (2000). Residual sediment transport paths on a tidal sand bank: a comparison between the modified Mc Laren model and bedform analysis. *Journal of Sedimentary Research* 70 (3), 470-477.
- Wu, J.X. & Shan, H.T.** (1999). Estuarine bottom sediment transport based on the 'McLaren model': a case study of Huangmaohai Estuary, South China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49, 265-279.

## **ANNEXE 4**

---

**OCEANIC FLOOD, EEL RIVER - STRATAFORM**

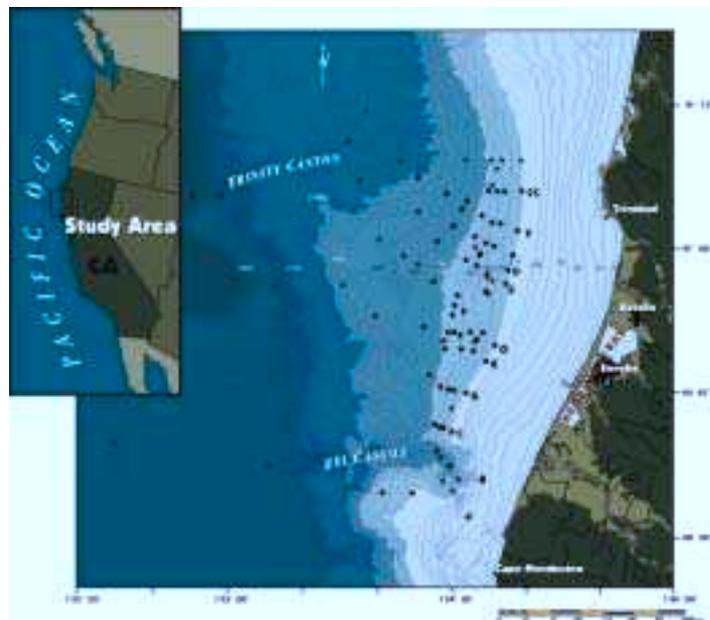
**SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS DANS LE  
CADRE DE L'ETUDE DES DEPOTS DES CRUES DE  
L'EEL RIVER OBSERVES SUR LA COTE OUEST  
DES ETATS-UNIS**

## Oceanic flood: l'Exemple de la côte Ouest des Etats-Unis, l'Eel river

Nous ferons ici un bilan des actions menées et des principaux résultats obtenus en terme de sédimentologie sur les dépôts fins de plate-forme mis en place après des crues exceptionnelles de l'Eel river.

### 1. Introduction

Les études menées par l'équipe canado-américaine du programme STRATAFORM (STRATA FORMation on Margins) ont porté sur la plate-forme continentale de l'Eel river au Nord de la Californie (Nittrouer & Kravitz, 1996; Nittrouer, 1999). Le long de cette côte, le plateau continental est large de seulement 10 à 20 km, avec un talus situé à 150 m de profondeur (*fig. A4-1*). La portion la plus étroite du plateau est localisée à 10 km à l'ouest de l'Eel river où un canyon sous-marin (*Eel Canyon*) incise la pente dès 90 m de profondeur. L'Eel river draine un bassin versant d'environ 9 500 km<sup>2</sup> et délivre chaque année une importante quantité de MES (silts et argiles), estimée entre 10 et 30 x 10<sup>6</sup> tonnes (Sommerfield *et al.*, 1999; Curran *et al.*, 2002). Ces apports se font sous la forme d'épisodes annuels et/ou événementiels lors de crues qui se produisent pendant les mois d'hiver (novembre à mars). La répétition de ces épisodes hivernaux de très courte durée (2 à 6 jours) fournit plus de 50% de la charge annuelle totale vers la plate-forme adjacente. Les systèmes dépressionnaires qui concernent cette région en hiver produisent de fortes pluies (en moyenne de 150 à 230 cm.an<sup>-1</sup>) mais aussi de violentes tempêtes (Wheatcroft & Borgeld, 2000). De ce fait, on observe une corrélation entre l'élévation du débit fluvial de l'Eel river et l'augmentation de l'énergie des vagues sur la plate-forme (Wheatcroft *et al.*, 1997).

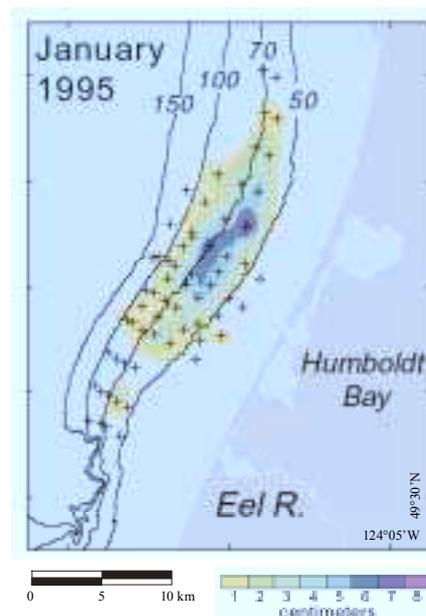


*Figure A4-1. Situation des points de prélèvements sédimentaires effectués au nord de l'Eel river après l'épisode de crue de mars 1999 (Alexander *et al.*, 2000).*

## 2. Caractéristiques des dépôts de crue de janvier 1995 et janvier 1997

Durant le mois de janvier 1995, une succession d'épisodes de pluies intenses et prolongées affecte le Nord de la Californie. L'Eel river connaît alors une crue dont la fréquence de retour est de 30 ans, avec un débit maximum instantané atteignant  $12\,300\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , soit 50 fois le débit annuel moyen (3<sup>ème</sup> plus fort débit en 85 ans d'enregistrement). En 35 jours, le total de la charge des sédiments fins (silts et argiles) expulsé à l'océan est estimé à  $25 \pm 3 \times 10^6$  tonnes. Un dépôt de crue (*flood deposit*) constitué à 95% de sédiments fins ( $< 20\ \mu\text{m}$ ) s'est mis en place sur la plate-forme médiane adjacente au Nord de l'embouchure de l'Eel river (7 à 30 km de l'embouchure) entre 50 et 110 m de profondeur (David, 1999; Goff *et al.*, 2002). Cette couche de vase est centrée autour de l'isobathe des 60-70 m, s'étendant sur 30 km de long et 8 km de large (fig. A4-2). Ce dépôt de crue, d'épaisseur maximum de 9 cm, ne représente que  $6 \times 10^6$  tonnes de sédiments fins. Il en résulte que 75 % des sédiments fins expulsés lors de la crue de l'Eel river ont été rapidement et largement dispersés vers le Nord sur la marge continentale adjacente. En effet, la morphologie de la marge de l'Eel river (faible largeur, canyon sous-marin) est favorable à la rapide dispersion des sédiments fins vers les grands fonds (Mullenbach & Nittrouer, 2000; Puig *et al.*, 2003). Les mesures d'activité du  $^7\text{Be}^2$  excluent toute autre source que celle des sédiments fins issus de l'Eel river pendant la crue de janvier 1995 (Sommerfield *et al.*, 1999). Les photos satellitaires confirment que le panache turbide de l'Eel river peut s'étendre sur des centaines de kilomètres en direction du nord (Scully, 2001; Scully *et al.*, 2002).

Durant l'hiver 1996-1997, l'Eel river connaît une autre très forte crue après deux années où les crues hivernales annuelles avaient été de faible ampleur (tabl. A4-1). Un nouveau dépôt de crue est apparu au Nord de l'Eel river centré autour de l'isobathe des 60 m à  $40^\circ 50' \text{N}$  et  $124^\circ 18' \text{W}$  (Ogston & Sternberg, 1999; Ogston *et al.*, 2000). Les pics instantanés de débit ont atteint  $11\,300\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  le 1<sup>er</sup> janvier 1997. Un nouveau dépôt de crue s'est développé au Nord de l'Eel river mais ces sédiments avaient des caractéristiques géochimiques et sédimentologiques distincts de ceux observés en janvier 1995.



**Figure A4-2.** Carte des isopaques des sédiments déposés après la crue de l'Eel river en janvier 1995. Bathymétrie de la zone d'étude en mètres (Wheatcroft 2000).

<sup>2</sup> Le  $^7\text{Be}$  est un radioélément d'origine cosmogénique de courte demi-période (53 jours). Sa présence dans le sédiment révèle des apports très récents, saisonniers. Les mesures de  $^7\text{Be}$  réalisées sur le dépôt de crue de janvier 1995 montrent un enrichissement de ce radionucléide.

<b>Eel river STRATAFORM</b>	<b>Janvier 1995</b>	<b>Mars 1995</b>	<b>Janvier 1997</b>
---------------------------------	---------------------	------------------	---------------------

*Tableau A4-1. Caractéristiques des débits de l'Eel river et des dépôts vaseux sur la plate-forme adjacente pour des événements de crue récents. Depuis le début du suivi des débits de l'Eel river, le fleuve a subi 7 crues majeures (i.e. débits  $> 8000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en 1938, 1955; 1964, 1974, 1986 1995 et 1997). L'épisode de 1964 est de loin le plus important avec un pic de débit évalué à  $21 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .*

Un suivi à haute-fréquence de l'évolution spatio-temporelle de ce dépôt de crue a été mis en place par une série de campagnes en mer (*rapid-response cruises*). Ainsi, le site de dépôt présentant le maximum de sédiments fins déposés suite à la crue de janvier 1995 a été prospecté en 1995 (mai et septembre), 1996 (mars, juillet et novembre) et 1997 (janvier) sur des points de référence. L'analyse des mêmes échantillons prélevés à différentes échelles temporelles montre que (Wheatcroft *et al.*, 1996; Drake, 1999):

- (1) les dépôts de crue fraîchement déposés sont rapidement remobilisés par les houles sur la plate-forme médiane: en mai 1995, le dépotcentre se situe plus au nord, et à des profondeurs supérieures pouvant atteindre 100 m.
- (2) dès mai 1995, les dépôts de crue situés dans les profondeurs inférieures à 70 m montrent une évolution rapide de la couche la plus superficielle. Les premiers centimètres deviennent plus grossiers du fait de la mise en place de sédiments sableux originaires du domaine plus côtier, transportés par les tempêtes (90% de fraction fine inférieure à  $20 \mu\text{m}$  en janvier 1995 puis 60 à 80% en mai 1995).
- (3) les dépôts sont aussi largement remaniés par un ensemble de processus physiques et biologiques, en particulier une bioturbation croissante avec le temps dans les 4 à 5 premiers centimètres. En mai 1995, l'épaisseur des sédiments remaniés est au maximum de 1 cm, de 3 cm en septembre 1995 et de 4 à 5 centimètres en juillet 1996.

### 3. Perspectives

Les deux crues historiques de l'Eel river (1995 et 1997) ont permis la mise en place rapide et la conservation partielle de dépôts de vase aux caractéristiques géochimiques et sédimentologiques distinctes. Actuellement, l'équipe de STRATAFORM étend son étude sur

les crues océaniques à d'autres systèmes fluviaux comparables à l'Eel river de la côte nord-ouest des Etats-Unis comme la Russian river (Drake & Cacchione, 1985), Klamath, Rogue et Umpqua rivers (Wheatcroft 2000). Un programme européen EuroSTRATAFORM a été lancé et concerne la dispersion et l'accumulation des sédiments dans la mer Adriatique, en particulier lors de la grande crue d'octobre 2000 du Po. Un suivi des dépôts de crue, apportés par le Po en juin et octobre 2001, a permis de caractériser les modifications biologiques et physiques du dépôt de crue et fournit d'importantes différences avec les résultats obtenus sur l'Eel river (Wheatcroft, 2000).

### Bibliographie de l'annexe 4

- Alexander, C.R., Elfers, T. & Simoneau, A.** (2000). Sedimentary processes on an active, accretionary continental slope. <http://www.skio.peachnet.edu/faculty/alexander/StrataformPoster.html>.
- Curran, K.J., Hill, P.S. & Milligan, T.G.** (2002). Fine-grained suspended sediment dynamics in the Eel River flood plume. *Continental Shelf Research*, 22 (17), 2537-2550.
- David, E.D.** (1999). Temporal and spatial variability of the sediment grain-size distribution on the Eel shelf: the flood layer of 1995. *Marine Geology*, 154, 169-182.
- Drake, D.E.** (1999). Temporal and spatial variability of the sediment grain-size distribution on the Eel shelf: the flood layer of 1995. *Marine Geology*, 154, 169-182.
- Drake, D.E. & Cacchione, R.W.** (1985). Seasonal variation in sediment transport on the Russian River shelf, California. *Continental Shelf Research*, 4, 495-514.
- Goff, J.A., Wheatcroft, R.A.B., Lee, H., Drake, D.E., Swift Donald, J.P. & Fan, S.** (2002). Spatial variability of shelf sediments in the STRATAFORM natural laboratory, Northern California. *Continental Shelf Research*, 22, 1199-1223.
- Mullenbach, B.L. & Nittrouer, C.A.** (2000). Rapid deposition of fluvial sediment in the Eel Canyon, northern California. *Continental Shelf Research*, 20, 2191-2212.
- Nittrouer, C.A.** (1999). STRATAFORM: overview of its design and synthesis of its results. *Marine Geology*, 154, 3-12.
- Nittrouer, C.A. & Kravitz, J.H.** (1996). STRATAFORM: A program to study the creation and interpretation of sedimentary strata on continental margins. *Oceanography*, 9 (3), Special publication: Creation and interpretation of Sedimentary Strata on Continental Margins, 146-152.
- Ogston, A.S. & Sternberg, R.W.** (1999). Sediment-transport events on the northern California continental shelf. *Marine Geology*, 154, 69-82.
- Ogston, A.S., Cacchione, D.A., Sternberg, R.W. & Kineke, G.C.** (2000). Observations of storm and river flood-driven sediment transport on the northern California continental shelf. *Continental Shelf Research*, 20, 2141-2162.
- Puig, P., Ogston, A.S., Mullenbach, B.L., Nittrouer, C.A. & Sternberg, R.W.** (2003). Shelf-to-canyon sediment-transport processes on the Eel continental margin (northern California). *Marine Geology*, 193, 129-149.
- Scully, M.E.** (2001). Modeling of critically-stratified gravity flows: application to the Eel River continental shelf, northern California, *Thesis of the Faculty of the School of Marine Science, The college of William and Mary*, 101 p.
- Scully, M.E., Friedrichs, C.T. & Wright, L.D.** (2002). Application of an analytical model of critically stratified gravity-driven sediment transport and deposition to observations from the Eel River continental shelf, Northern California. *Continental Shelf Research*, 22 (14), 1951-1974.
- Sommerfield, C.K., Nittrouer, C.A. & Alexander, C.R.** (1999). <sup>7</sup>Be as a tracer of flood sedimentation on the northern California continental margin. *Continental Shelf Research*, 19, 335-361.

- Syvitski, J.P. & Morehead, M.D.** (1999). Estimating river-sediment discharge to the ocean: application to the Eel margin, northern California. *Marine Geology*, 154, 13-28.
- Wheatcroft, R.A.** (2000). Flood sedimentation on the Pacific northwest continental margin. Introducing Research in the college of Oceanic & Atmospheric Sciences: [http://www.oce.orst.edu/Publications/page\\_19.pdf](http://www.oce.orst.edu/Publications/page_19.pdf).
- Wheatcroft, R.A., Borgeld, J.C., Born, R.S., Drake, D.E., Leithold, E.L., Nittrouer, C.A. & Sommerfield, C.K.** (1996). The anatomy of an oceanic flood deposit. *Oceanography*, 9 (3), Special publication: Creation and interpretation of Sedimentary Strata on Continental Margins, 158-162.
- Wheatcroft, R.A., Sommerfield, C.K., Drake, D.E., Borgeld, J.C. & Nittrouer, C.A.** (1997). Rapid and widespread dispersal of flood sediment on the northern California margin. *Geology*, 25 (2), 163-166.
- Wheatcroft, R.A. & Borgeld, J.C.** (2000). Oceanic flood deposits on the northern California shelf: large-scale distribution and small-scale physical properties. *Continental Shelf Research*, 20, 2163-2190.

## **ANNEXE 5**

---

**COMPLEMENT D'INFORMATION AU CHAPITRE IV:  
DEPOTS HOLOCENES DE SAINT-COME DE  
FRESNE - ASNELLES ET DE L'ANCIEN RUISSEAU  
DE LUC-SUR-MER**

## Les formations tourbeuses sur la côte du Calvados

---

Les dépôts holocènes du littoral bas-normand sont connus et étudiés depuis longtemps (*fig. IV, p. 230*). Il m'a semblé important de rappeler leurs principaux résultats ici, de manière contextuelle générale. Par ailleurs, j'ai pu compléter d'anciennes observations réalisées dans l'ancien ruisseau de Luc-sur-Mer (Hue, 1938; Bassompierre, 1944) et procéder à une datation  $^{14}\text{C}$  des sédiments tourbeux présents sous la plage actuelle d'Omaha beach.

### 1. Saint-Côme de Fresné – Asnelles

Les dépôts de tourbe les plus remarquables se situent sur le littoral entre la commune de Saint-Côme-de-Fresné et de Ver-sur-Mer (*fig. IV-3, p.220, n° 5*). Ils offrent une des séries stratigraphiques les plus complètes de Normandie pour les douze derniers millénaires. C'est au début du Boréal, fin Préboréal qu'apparaissent les premières tourbes dans la région d'Asnelles. A cette époque, le niveau marin est très déprimé. En effet, des dépôts organiques du Boréal sont retrouvés en Normandie à -13 m dans la vallée de l'Orne (Clet-Pellerin *et al.*, 1976; Pellerin, 1977) et entre -20 et -28 m dans celle de la Seine (Ters *et al.*, 1971; Huault *et al.*, 1974; Lefebvre *et al.*, 1974; Lefebvre, 1977). Dans ces conditions, les tourbes d'Asnelles se sont formées en domaine de marais maritime. On retrouve de vastes bancs de tourbe contenant des souches en place, des troncs d'arbre et de nombreux mollusques dulçaquicoles ou terrestres. Ils sont interstratifiés avec des argiles blanches d'eau douce et localement des sables marins liés à des incursions de la mer dans l'ancien marais (dépôts de washover). Malgré la remontée rapide du niveau marin au Boréal, la tourbière d'Asnelles demeure en retrait des influences marines. Les premiers dépôts marins enregistrés sont datés entre 4 000 et 3 000 ans BP (Clet-Pellerin *et al.*, 1987; Lautridou *et al.*, 1987), milieu du Subboréal, et font suite à une sédimentation fluvio-marine ou littorale.

Les analyses palynologiques et les datations  $^{14}\text{C}$  (Morzadec-Kerfourn & Delibrias, 1972) ont permis d'établir la stratigraphie de ces dépôts tourbeux. Les spores de fougères représentent plus de 80% du total de l'inventaire palynologique, puis les proportions en *Pinus* (Pin) deviennent plus importantes et le *Corylus* (noisetier) commence à se développer (Clet-Pellerin *et al.*, 1987). Ces tourbes sont souvent associées à de fines particules calcaires résultant de la précipitation du carbonate de calcium en liaison avec le degré hydrométrique élevé des eaux de l'ancien marécage (Larsonneur, 1971). L'essentiel de la tourbification s'effectue pendant la période Boréale (1 cm/10 ans) avec le développement d'une végétation de *Pinus* (53%, pin), *Corylus* (20% jusqu'à 60%, noisetier), *Quercus* (chêne) et *Alnus* (aulne) et au sommet du *Tilia* (Tilleul). Pendant la période Atlantique, la sédimentation

argilo-tourbeuse se poursuit avec une domination du chêne et du noisetier typique de cette région. Au Subboréal, les spores de fougères, bien que toujours dominantes, diminuent et le noisetier joue le rôle de l'espèce pionnière avant l'accroissement de l'aulne. Enfin, le Subatlantique est caractérisé par le développement tourbeux d'un marais maritime ou d'un schorre avec prolifération de plantes halophiles.

## 2. L'ancien ruisseau de Luc-sur-Mer

Sur la commune de Luc-sur-Mer, on retrouve des traces du colmatage flandrien sur l'emplacement de l'ancien ruisseau de Luc-sur-Mer (*fig. IV-3, p. 220, n° 3*). Des études datant de 1925 (Hue) et 1944 (Bassompierre) signalent la présence de niveaux de tourbe et d'arbres couchés avec les souches bien visibles à 150 m du rivage. A partir de trois forages réalisés sur la plage (1 m 35 maximum), Bassompierre (1944) constate que la tourbe se présente de manière lenticulaire sous la plage actuelle (30 à 80 cm de sable actuel) et s'élargie en bas de plage pour atteindre 0,60 m à 200 m du rivage. La tourbe comporte des niveaux sableux avec des petites planorbes, des fragments de bois et des fruits de chêne et des noisettes (Bassompierre, 1944). Mais la présence de nombreux coquillages de genre *Mytilus* indique une proximité de la mer qui, lors des tempêtes, devait rompre le cordon littoral, aboutissant à des incursions marines dans le marais. Des argiles blanchâtres, caractéristiques des milieux d'eau douce, contenant de rares débris végétaux ont également été mises en évidence sur un des sondages. Ces argiles se situent sous les niveaux tourbeux et constituent l'ancien sol de la tourbière, les souches d'arbres y enfoncent leurs racines.

Cette tourbe s'est formée dans la dépression de l'ancienne vallée du ruisseau de Luc-sur-mer. Des restes d'industries humaines (silex et débris de poterie néolithique et romaine) ont été retrouvés dans cette tourbe (Cahiers de la faculté des lettres de l'université de Caen, 1944-1945). Cependant, un tel mélange d'objets ne peut servir à dater ces échantillons et les analyses polliniques n'ont pas permis d'apporter d'informations supplémentaires (Elhai & Larsonneur, 1969). Par analogie avec les dépôts voisins (Bernières, Ver-sur-Mer et Omaha beach), ces dépôts tourbeux se sont probablement formés à une époque relativement récente, pendant le Subatlantique. Ils correspondent aux derniers épisodes de tourbification sur le littoral du Calvados vers 2 500-2 000 ans BP, ou plus récemment autour de 1810 +/- 70 ans BP (UL-2276) à Omaha beach, datation  $^{14}\text{C}$  que j'ai obtenu sur un niveau de tourbe situé sous la plage actuelle (0 NGF soit + 4,72 m CM).

A Luc-sur-Mer, en avril 2001, j'ai observé des souches et des troncs renversés bien visibles en bas de plage avec la présence de trois troncs d'arbres (*fig. A5-1a,b*), déjà signalés dans les années 1925 (Hue, 1938). Le sable recouvre de manière très superficielle cette tourbière, et de larges surfaces contenant de nombreux fragments de végétaux (radicelles, tiges de phragmites, branches, troncs et souches d'arbres) apparaissent (*fig. A5-1c*). Les troncs

montrent fréquemment de terriers de tarets apparus lors de l'invasion marine dans l'ancien marais maritime (fig. A5-1d).

### Bibliographie de l'annexe 5

- Bassompierre, P.** (1944). La tourbe dans le Calvados et principalement au nord de Caen. *Diplôme d'études supérieures de géologie*, Caen, 41 p.
- Cahiers De La Faculté Des Lettres De L'université De Caen** (1944-1945). L'évolution verticale: les anciens niveaux marins, chapitre 3: La transgression flandrienne proprement dite, Le littoral de la plaine de Caen: étude de géographie physique, 50-63.
- Clet-Pellerin, M., Huault, M.-F., Larsonneur, C. & Pellerin, J.** (1976). La basse vallée de l'Orne: le remblaiement périglaciaire et postglaciaire, l'évolution paléogéographique et l'histoire de la végétation. *Bulletin de la Société Limnène de Normandie*, 105, 23-44.
- Clet-Pellerin, M., Dupeuble, P.-A., Helliun, M., Lefebvre, D., Pellerin, J., Brebion, P., Lauriat-Rage, A., Laudridou, J.-P. & Rioult, M.** (1987). Les formations marines et continentales du Pléistocène récent dans la région d'Asnelles-Saint-Côme-de-Fresné (Calvados). *Bulletin du Centre de Géomorphologie du CNRS*, 32, 71-98.
- Elhai, H. & Larsonneur, C.** (1969). Dépôts tardiglaciaires et post glaciaires sur la côte du Calvados. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 2, 93-103.
- Huault, M.-F., Lefebvre, D., Hommeril, P., Guyader, J., Giresse, P. & Larsonneur, C.** (1974). L'évolution de la basse-vallée de la Seine depuis la dernière glaciation. *Mémoire de l'Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine (IGBA)*, 7, 313-319.
- Hue, E.** (1938). Sur une progression marine au ruisseau de Luc (Calvados). *Bulletin de la Société des Antiquaires de Normandie*, XLV, 384-385.
- Larsonneur, C.** (1971). Manche centrale et Baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles, *Thèse d'Etat de l'Université de Caen*, 394 p.
- Lautridou, J.-P., Pellerin, J. & Clet-Pellerin, M.** (1987). Les formations marines et continentales d'Asnelles-Saint-Côme-de-Fresné, *Association Française pour l'étude du Quaternaire, excursion du 28 au 31 mai 1987 "La normandie"*, 161-170.
- Lefebvre, D., Huault, M.-F., Guyader, J., Giresse, P., Hommeril, P. & Larsonneur, C.** (1974). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine: synthèse sédimentologique, stratigraphique et paléogéographique. *Bulletin d'Information Géologique du Bassin de Paris*, 39, 27-36.
- Lefebvre, D.** (1977). Le prisme alluvial de l'estuaire de la Seine. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre*, LXIV (4), L'estuaire de la Seine au Quaternaire, 67-72.
- Morzadec-Kerfourn, M.-T. & Delibrias, G.** (1972). Analyses polliniques et datations radiocarbone des sédiments quaternaires prélevés en Manche centrale et orientale. *Mémoire du BRGM*, 79, 160-165.
- Pellerin, J.** (1977). Les nappes alluviales de l'Orne, leurs altérations et leurs relations avec les dépôts marins sur la côte du Calvados. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre*, XIV (4), 75-80.
- Ters, M., Azema, C., Brebion, P., Churcher, C.S., Delibrias, G., Deneffe, M., Guyader, J., Lauriat-Rage, A., Mathieu, R., Michel, J.-P., Osborne, P.J., Rouvillois, A. & Shotton, F.W.** (1971). Sur le remblaiement holocène dans l'estuaire de la Seine au Havre (Seine Maritime), France. *Quaternaria*, XIV, 151-174.



**Figure A5-1.** Troncs renversés et tourbe fossile présente sous la plage de Luc-sur-Mer à environ 150 m du haut de plage dans l'alignement de l'ancien ruisseau. Photos A et B: troncs d'arbre couchés sur la plage. Photo C: niveaux tourbeux à nombreux morceaux de bois non décomposés. Photo D: terriers de tarets sur l'écorce de l'un des troncs d'arbre couchés.

## ANNEXE 6

---

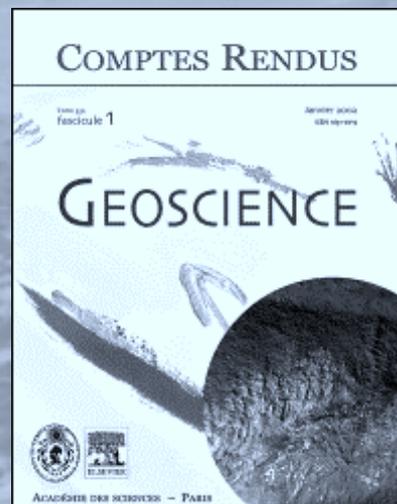
**Sébastien GARNAUD, Patrick LESUEUR, Sandric LESOURD, Nicole  
POUPINET et Jean-Claude BRUN-COTTAN**

**C.R. Geoscience 334 (2002), 323 –330**

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

**Résumé:**

Les premiers résultats des études sédimentologiques réalisées depuis 1998 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 crues de la Seine. Dans les petits fonds concernés (<10 m de profondeur d’eau), la mobilité de la fraction fine des sédiments déposés est toutefois importante ; il en résulte une vaseière subtidale temporaire formant, en période de forts débits fluviaux, une partie distale du système estuarien de la Seine.



**Abstract:**

This paper present 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 during high floods episodes. In the subtidal area (< 10 m depth), mobility of fine deposit is important and temporary mud deposited during high period discharge, composes part of the distal estuarine system of the Seine River.

C. R. Geoscience 334 (2002) 323–330  
 © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés  
 S1631-0713(02)01759-5/FLA

Géosciences de surface / Surface Geosciences

## 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@geosciences.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 800–1000  $\mu\text{m}$ ) 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-

Pour citer cet article : S. Garnaud *et al.*, C. R. Geoscience 334 (2002) 323–330

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.

## 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-

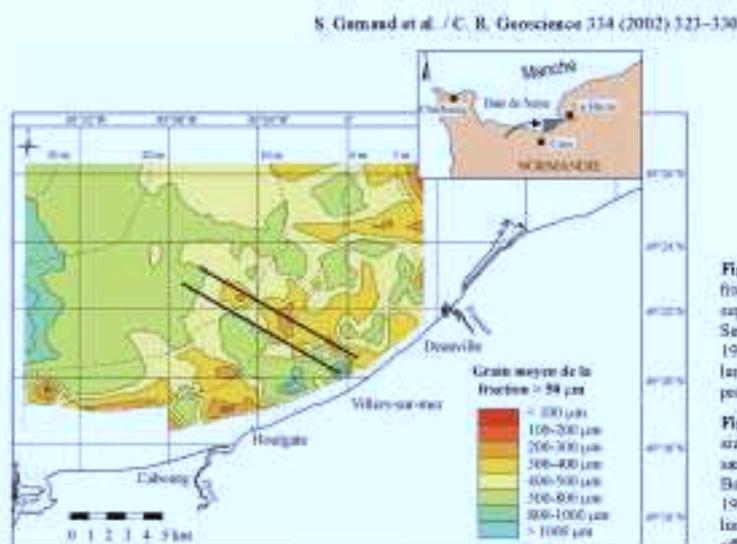
These variations in the superficial sediment of the Bay of Seine can be explained by three major hydrodynamical and meteorological conditions that control fine-grained sediment behaviour: (1) macrotidal currents dominated by flood-tides that reshape and redistribute the sediments, (2) the Seine hydrodynamic 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.

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 « vase 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. Selon des missions BENTHOSEINE 1998, 1999 et VASTEDIBA 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 VASTEDIBA 2000). Continuous line: two radials/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

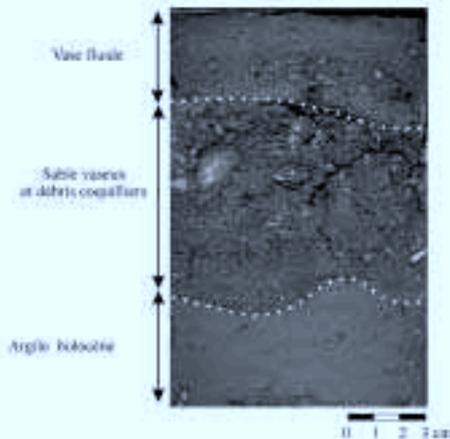
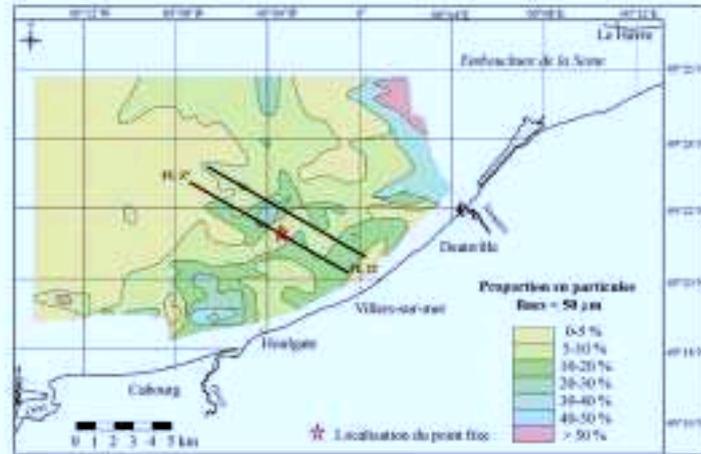
La cartographie des fonds de la baie de Seine orientale, réalisée depuis 1998, montre un gradient d'affinement des sédiments du large (grain moyen 800–1000 µm) vers la côte (grain moyen compris entre 100 et 200 µm), en accord avec les résultats de Larssonneur [10] à l'échelle de la baie de Seine (Fig. 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-

To cite this article: S. Garnaud *et al.*, C. R. Geoscience 334 (2002) 327–330

**Figure 2.** Répartition spatiale de la proportion en particules (< 50 µm) dans le sédiment total de la baie de Seine orientale (février 2000). En noir, entre Deauville et Hovigère, 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).



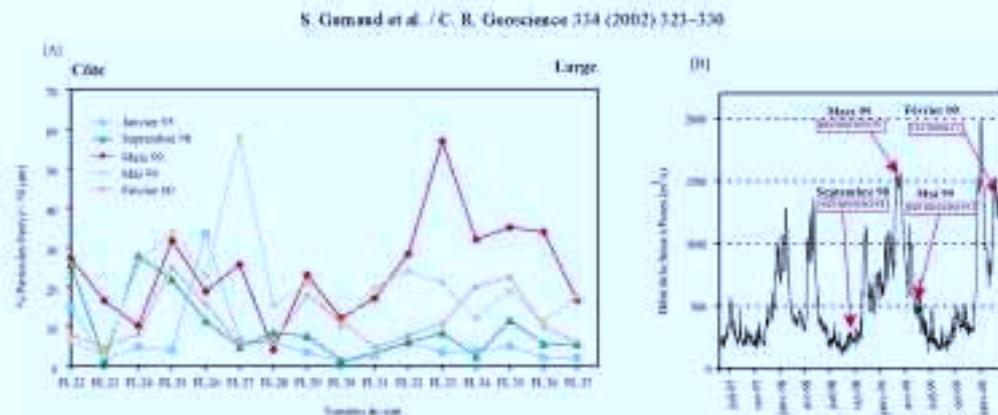
**Figure 3.** Exemple de carotte Rotock prélevée en mars 1999 au site du point fixe (Fig. 2). On observe trois niveaux : une vase molle superficielle (2–3 cm), un sable vaseux contenant des coquilles brisées (3 cm) et des argiles holocènes. Une datation récemment obtenue sur un débris de bois interité dans cette argile indique un âge d'époque boréale (6530 BP ± 100 ans, datation  $^{14}\text{C}$  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 positions of sediments can be distinguished: (1) vaseous of fluid-to-soft mud 2–3 cm, (2) muddy shelly sand, silt (3) Holocene clayey substrate. Recent  $^{14}\text{C}$  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].

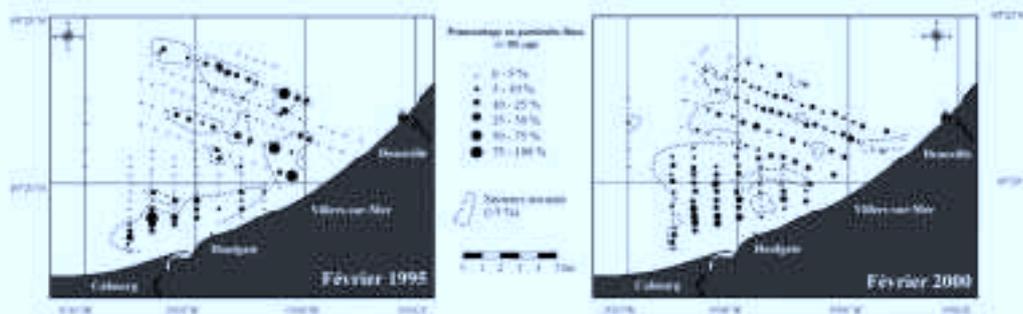
### 3.2. Évolution spatio-temporelle de la vaseire temporaire subtidale

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 carotés 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. Evolution temporelle et spatiale du pourcentage en particules fines (< 50 µm) le long de la cordale FL37–FL22 (Fig. 2) sur le site atelier de la vaseire resuspendue subtidale au large des côtes de 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 this during 1997–2000 period.



**Figure 5.** Evolution spatiale de l'envasement co-costale entre Calvados et Deauville entre février 1995 et 2000.

**Figure 5.** Spatial evolution of fine-grained particles (< 50 µm) between Calvados 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 vaseire subtidale de la base 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

Pour citer cet article : S. Garnaud *et al.*, C. R. Geoscience 334 (2002) 323–330

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 péliques avaient une extension maximale durant l'hiver 1981, l'envasement des fonds au large du Calvados se produisait plutôt au cours de l'été en 1982, en période de calme hydrodynamique [1, 3].

Nos résultats montrent que, sur le site choisi comme étant représentatif de la vaseière 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  $-6 \text{ m CM}$  (vaseière 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 vaseière pré-littorale entre  $-5$  et  $-2 \text{ m CM}$ .

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 ré-

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.

S. Garnaud *et al.* / C. R. Geoscience 334 (2002) 323–330

En baie de Seine sud-orientale, une vaseuse temporaire 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, accrues 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 (NO 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. Hodin, C. Larssonneur, J. Massias, M. Queney, Contribution des traceurs radioactifs à l'étude des mouvements sédimentaires en baie de Seine, La baie de Seine (Grèce-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. Dubreuil, D. Boust, P. Guarnierat, Sédiments et dynamique sédimentaire en baie de Seine, in : XVIII<sup>e</sup> journées de l'hydrologie, Marseille, 1984, pp. 1.3.1–1.3.8.
- [4] J.-M. Bouchet, Distribution estivale des pérites dans les sédiments superficiels de la plate-forme Sud-Gascogne, in : Coll. Int. Océanol., Perpignan, 1987, pp. 21–22.
- [5] P. Canting, Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes. Cas de la Gironde, thèse, université Bordeaux-I, 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. Cicchiore, Seasonal variation in sediment transport on the Russian River shelf, California, Cont. Shelf Res. 4 (1985) 495–514.
- [8] K.O. Emery, Bolus 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 (Grèce-Manche), université de Caen, 24–26 avril 1985, in : Actes de colloques n° 4, Ifremer, 1986, pp. 95–108.
- [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. Laiguel, 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. Levey, Etat 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 laboratoires, 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: examples 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. Rétière, F. Genil, Spatio-temporal persistence of the Abra Albus-Pectanaria Korumi muddy-fine sand community of the eastern Bay of Seine, J. Mar. Biol. Ass. UK 77 (1997) 1165–1185.
- [18] D. Vadet, 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. Volinat, Les érosions du littoral du Calvados et les aménagements de l'estuaire de la Seine, in : 22<sup>e</sup> Cah. rech. hydr. sur le régime des côtes, Imprimerie nationale, Paris, 1920, 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.