

# Rapport

# Seine-Aval 4



## COLMATAGE

Couplages bio-morpho-sédimentaires  
et dynamique à long terme des habitats  
et peuplements benthiques et ichtyologiques  
en Seine aval



Dauvin J-C., Brind'Amour A., Cuvilliez A., Dancié C.,  
Desroy N., Le Hir P., Lesourd S., Mear Y., Morin J.



## Sommaire

Rappel des objectifs généraux de la première phase du projet 2007-2009	4
Liste des scientifiques ayant participé au projet COLMATAGE	6
Animation du projet (sous la responsabilité du coordinateur)	9
RESULTATS SCIENTIFIQUES DETAILLES	15
1. Recensement et organisation des bases des données historiques	15
1.1. Sédiment	15
1.1.1. Base de données SEDIMENT	15
1.1.2. Variabilité des données sédimentologiques	19
1.2. Base de données MACROBENTHOS (MABES 3)	22
1.3. Base de données ICTHYOLOGIE	22
2. Etat actuel et évolution à long-terme de l'estuaire moyen et l'estuaire aval	23
2.1. La couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine : situation 2008-2010	23
2.2. Matériel et méthode pendant COLMATAGE	25
2.3. Contexte hydrologique	29
2.4. Du point de vue de la granulométrie	30
2.5. Cartographies des sédiments superficiels 2009-2010	40
2.6. Cartographies des sédiments superficiels 2009-2010	46
2.7. Apports nouveaux	48
3. Evolution des surfaces intertidales non végétalisées de la fosse Nord (2000-2011)	54
4. Habitats benthiques	57
4.1. Achat et utilisation d'un système ROV SeaBotix	57
4.2. Analyse expérimentale des processus fins du rôle des structures biogéniques dans les processus de sédimentation	61
4.3. Echantillonnage des <i>Ophiothrix</i> en baie de Seine	62
4.4. Etude des relations entre les populations d'Ophiures et le sédiment	65
4.5. Nouvelles espèces pour la partie orientale de la baie de Seine	74
4.6. Réflexion sur la typologie des habitats marins	77
4.7. Campagne COLMATAGE 2010	78
4.8. Foraminifères	79
4.9. Etat des lieux (2008-2009) du compartiment benthique (macrofaune et sédiments) du système "baie de seine orientale – embouchure" et changements a long terme (1988-2009)	80
4.9.1. Granulométrie des sédiments : état actuel (2008-2009) et évolution à long terme (1988-2009)	80
4.9.2. Définition des faciès sédimentaires, différents points de vue : état actuel (COLMATAGE 2008-2009)	91
4.9.3. Proposition de synthèse de l'organisation sédimentaire dans le système "baie de Seine Orientale – embouchure"	95
4.9.4. Caractéristiques et organisation de la macrofaune benthique en relation avec son environnement hydro-morpho-sédimentaire complexe	100
4.9.5. Principaux apports de la thèse	107
5. Evolution de la composante halieutique et définition d'une typologie des habitats marins estuariens basée sur les communautés piscicoles	115
5.1. Les campagnes d'échantillonnage halieutique	116
5.2. Comparaison d'engin et protocole de d'échantillonnage pour l'étude des poissons	119
5.3. Cartographie et analyse des évolutions temporelles des peuplements de poissons et invertébrés de baie de Seine vu par l'échantillonnage au chalut à perche	122
5.4. Couplage benthos-poissons à partir de données historiques	127

5.5. Analyse du fonctionnement et des relations trophiques	129
5.6. Conclusion	134
6. Etude de la variabilité spatiale et tidale des assemblages piscicoles dans les systèmes de filandre de l'estuaire aval - Années 2008 et 2009	136
6.1. Travaux menés en 2008	136
6.2. Travaux menés en 2009	139
7. Observations de la variabilité de l'environnement physique et recherche de liens avec la macro-faune benthique	143
7.1. Rappel des objectifs	143
7.2. Actions réalisées	144
7.3. Déroulement des opérations de 2008 à 2011	148
7.4. Synthèse des données altimétriques	150
7.5. Analyse des résultats de la campagne d'érodimétrie d'avril 2010, rôle de la faune benthique	173
7.6. Synthèse – Conclusions	184
Références citées dans le rapport	198
Liste des publications publiées et communications présentées par l'ensemble des équipes du projet	201

## **Rappel des objectifs généraux de la première phase du projet 2007-2009**

En 2007, COLMATAGE, proposition pluridisciplinaire associant sept équipes de scientifiques (dont six avaient participé auparavant au programme Seine-Aval) se donnait trois objectifs principaux :

1. Recensement des données existantes sur le territoire de la partie orientale de la baie de Seine et l'estuaire aval jusqu'à la Risle : sédimentologie, ichtyofaune et bancarisation de ces données comme cela venait d'être fait au niveau du macrobenthos dans MABES2 réalisé de concert avec le GIP SA.
2. Analyse conjointe des évolutions morpho-sédimentaires (confrontation avec les résultats des modèles) et celles des habitats et peuplements benthiques et ichtyologiques intertidaux et subtidaux.
3. Définition d'une typologie des habitats marins estuariens dans le gradient bio-sédimentaire de la baie de Seine (projet conjoint avec les études sur les extractions de granulats).

Etaient concernées dans ce projet : i) la bancarisation de l'existant (macrobenthos, sédimentologie et ichtyofaune), ii) la valorisation croisée de façon à décrire les évolutions spatio-temporelle morpho-sédimentaires et celles des habitats et peuplements benthiques au cours des trente dernières années, iii) la réalisation de nouvelles campagnes communes en 2008, 2009 et 2010, leurs analyses conjointes avec d'autres campagnes (GPMR et GMPH) réalisées sur le même territoire dans le cadre d'autres opérations (suivi Port 2000, dragages et dépôts de dragage Kannick et Octeville, granulats), iv) l'analyse expérimentale des processus fins du rôle des structures biogéniques dans les processus de sédimentation, v) une cartographie typologique des principaux habitats de la baie de Seine.

Deux autres questionnements avaient été proposés en 2007 puis revus ensuite pour la seconde phase du projet 2010-2011.

4. Proposition à terme d'une stratégie d'observation de cette partie orientale de la baie de Seine de l'estuaire pour le compartiment sédiment/faune benthique et démersale au delà de SA4 c'est à dire pour au moins 2025 (date des analyses de prospectives actuelles).
5. Utilisation de la connaissance de la dynamique des habitats et peuplements pour décrire leur évolution probable en fonction des scénarios d'aménagements de l'estuaire ou des variations des forçages climatiques, qui sera concrétisé dans la seconde phase du projet (2010-2011).



Suite aux travaux réalisés pendant la première phase (2007-2009) et à leur évaluation par le Conseil Scientifique du programme Seine Aval, il a été choisi de cibler pour l'ensemble de la seconde phase (2010-2011) deux principales actions.

### **Action 1. Etat actuel de l'écosystème**

Poursuite d'opérations commencées dans la première phase de COLMATAGE 2007-2009  
Typologie des habitats marins estuariens dans le gradient de la baie de Seine

### **Action 2. Stratégie d'observation à long terme de l'écosystème au delà de SA4 jusqu'en 2025**

Dans un estuaire, milieu sédimentaire complexe, il est indispensable de concevoir des stratégies d'échantillonnage spécifiques permettant de détecter les hétérogénéités spatiales existantes. Lorsque l'objectif est de créer des cartes de sédiment ou des compartiments biologiques facilitant la compréhension des environnements par des non-spécialistes, il est très important d'optimiser le nombre de prélèvements et le plan d'échantillonnage. A partir de la base de données mise en place complétée par les informations obtenues dans COLMATAGE, une réflexion sera proposée, grâce à la mise en œuvre des outils de la géostatistique, un plan d'échantillonnage (temps, espace) capable de rendre compte à moindre coût des évolutions guidant la distribution de la fraction fine des sédiments. Dans le même esprit, il est proposé d'optimiser un réseau d'observations à mettre en place, avec un souci de minimalisation de l'échantillonnage respectant au mieux la diversité des habitats benthiques y compris ceux de l'ichtyofaune démersale dans la stratégie de suivi à long terme des habitats à mettre en place au delà de COLMATAGE.

## Liste des scientifiques ayant participé au projet COLMATAGE

### Coordonnateur du projet

Nom, prénom, qualité du responsable scientifique : DAUVIN Jean-Claude, Professeur  
Employeur : janvier 2007-octobre 2010

- Université / Organisme : Université des Sciences et technologies de Lille
- Laboratoire / Direction : Station Marine de Wimereux
- UMR / Service : FRE CNRS ELICO puis UMR CNRS LOG
- Adresse : 28, avenue Foch, BP 80, 62930 Wimereux
- E-mail / téléphone / fax : [jean-claude.dauvin@univ-lille1.fr](mailto:jean-claude.dauvin@univ-lille1.fr) ; tél. 03 21 99 29 20 ; fax. 03 21 99 29 01

Employeur : depuis novembre 2010

- Université / Organisme : Université de Caen Basse Normandie
- Laboratoire / Direction : Morphologie Continentale et Côtière
- UMR / Service : UMR CNRS M2C
- Adresse : 24 rue des Tilleuls , 14000 caen
- E-mail / téléphone / fax : [jean-claude.dauvin@unicaen.fr](mailto:jean-claude.dauvin@unicaen.fr) ; tél. 02 31 56 57 08 ; fax. 02 31 56 57 57

### Structures et Scientifiques

**Organisme : Université des Sciences et Technologies de Lille, Station Marine de Wimereux, UMR ELICO-LOG**

ALIZIER Sandrine, Doctorante Seine-Aval  
ABQUEZ Thomas, M1 2011  
BIONET Michael, M1 2010  
DAUVIN Jean-Claude, PR  
GLIPPA Olivier, Doctorant  
HABI Sofiane , M1 2009  
JANSON Anne-Laure, CDD  
LECUYER Eric, ITA CNRS  
LOZACH Sophie Doctorante (pro parte)  
MARMIN Stella, DSR  
OSSA CARRETETO José, Stagiaire espagnol  
TOUS RIUS Master 2 puis doctorante (pro parte)  
ROLET Céline, CDD  
RUELLET Thierry, Post-doctorant contractuel  
SOLTESZ Fanny, CDD  
WEPPE Adeline, M1 2010

**Organisme : Université du Littoral Côte d'Opale, Maison de la recherche en environnement naturel, UMR-ELICO, LOG**

GENSAC Erwann, Etudiant  
LESOURD Sandric, MCF  
ROUZE Claire, Etudiante

**Organisme : Université de Caen Basse-Normandie, UMR M2C**

BAFFREAU Alexandrine, M1 2011  
 DAUVIN Jean-Claude, PR  
 DEFENOULLIERE Pauline CDD 2010 et 2011  
 DELHAY Jean-Baptiste PECTOW 2011  
 DUBRULLE Carole, IE CNRS  
 KHOUTRIA Dalal, M1 2011  
 LESUEUR Patrick, PR  
 LOZACH Sophie Doctorante (pro parte)  
 MARMIM Stella, Doctorante (pro parte)  
 THOUROUDE Coralie, T UCBN  
 VASSET Noémie, CDD 2010 et 2011

**Organisme : Université de Rouen, M2C (2007-2009)**

DELOFFRE Julien, MCF  
 LAFITE Robert, PR  
 LEBOT Sophie, MCF

***Organisme : Université du Havre, UMR LOMC***

CUVILLIEZ Antoine, MCF

***Organisme : IFREMER***

HMNM-RHPEB (Port en Bessin) et EMH (Nantes)

MORIN Jocelyne, Cadre de Recherche Ifremer  
 BRIND'AMOUR Anik, Cadre de Recherche Ifremer

DYNECO-PHYSED (Brest)

BASSOULLET Philippe  
 CANN Philippe  
 JESTIN Hervé  
 LE BERRE David  
 LE HIR Pierre  
 SILVA JACINTO Ricardo  
 VERNEY Romaric

**LER Saint-Malo**

DESROY Nicolas Cadre Ifremer  
 ROUGERIE Michel  
 GERLA Daniel

***Organisme : Cellule du Suivi du Littoral Normand, Le Havre***

BALAY Pierre T

BERNARD Marie T  
 BERNO Aurélien T  
 CHAIGNIN Céline T  
 DANCIE Chloé IR  
 DE ROTON Gwenola IR (2007-2009)  
 DUBUT Séverine T  
 DUHAMEL Serge IR (2007-2009)  
 HANIN Camille T  
 JOURDE Jérôme IE  
 LANSHERE Julien IE  
 LAURENT Sandrine IE  
 LE THOER Delphine T  
 MANGANE Adama T  
 Rouyer Armelle T (2007-2009)  
 SIMON Serge IR (2007-2009)  
 VIGNOT Céline T

**Organisme : GEOCEANO EA 4253 LUSAC (Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg)**

BERYOUN Khadija, Doctorante (pro parte)  
 MEAR Yann, MCF  
 MURAT Anne, MCF  
 POIZOT Emmanuel, IE

**Organisme : Station Biologique de Roscoff, Paris VI, UMR CNRS 7144**

Participation en 2011, campagne PECTOW

FELTRINI Florian, M1 2011  
 GENTIL Franck, MCF  
 HOUBIN Céline, AI CNRS  
 RENIE Jocelyn, CDD  
 THIEBAUT Eric, MCF

**Organisme : Université d'Angers, Laboratoire des Bio-Indicateurs Actuels et Fossiles BIAF**

Participation non contractuelle sur l'étude des foraminifères

BAYONA Yannick, M2 2009  
 JORRISSEN Frans, PR  
 GESLIN Emmanuelle, MCF  
 LULE Jonthan, M1 2010  
 MOTJAHID Merymen, Doctorante

## **Animation du projet (sous la responsabilité du coordinateur)**

Les ordres du jour, les comptes-rendus des réunions et des séminaires sont disponibles sur la plate-forme d'échange Seine-Aval

<http://seine-aval.crihan.fr/silverpeas/Publication/>

### **Réunions du projet**

Les réunions COLMATAGE ont eu lieu aux dates suivantes :

- 28 novembre 2007 (réunion de lancement de COLMATAGE) Rouen
- 28 mars 2008 Rouen
- 30 juin et 1 juillet 2008 Rouen
- 27 novembre 2008 Rouen
- 18 et 19 mars 2009 Rouen
- 5-6 novembre 2009 Rouen
- le 13 avril 2010 Rouen
- et 2 juin 2010 : réunion couplée au premier séminaire sur le couplage benthos/poissons et point d'avancement du projet, Wimereux
- 18-20 novembre 2010 : réunion couplée au séminaire avec le GIP sur le SIG 'Habitats fonctionnels' et point d'avancement du projet, Rouen
- 15-16 juin 2011 : réunion couplée avec le séminaire-atelier développement Instrumental en Hydro-morpho-sédimentaire et en biocénotique en estuaire de la Seine, Caen
- 7-8 décembre 2011 : réunion couplée avec le dernier séminaire consacré à la stratégie d'Observation, à long terme des compartiments étudiés dans COLMATAGE

La quasi-totalité des participants à COLMATAGE ont assisté aux réunions et au moins un représentant des équipes y a participé.

Soit un total de 11 réunions dont quatre couplées à des séminaires

## Séminaires

Dans la seconde phase du projet, il a été prévu d'organiser quatre séminaires.

### ***Séminaire 1 COLMATAGE Couplage benthos/poissons : 1 et 2 juin 2010 à Wimereux***

Le premier séminaire s'est tenu en juin à Wimereux et a porté sur les comparaisons des données benthos (faune et sédiment) et poissons démersaux afin de comparer les aires de distribution des poissons par rapport au benthos en tant que ressources. Une communication orale a été présentée par Eric Dutrieux à Nantes comme valorisation de ce séminaire.

### ***Séminaire 2 COLMATAGE – SIG « Habitats Fonctionnels » : 18-19 Novembre 2010 à Rouen***

Le second séminaire, organisé de concert avec le GIP Seine-Aval, a porté sur l'outil mis en œuvre au GIP : le SIG « Habitats Fonctionnels ». Il s'est déroulé sur deux jours les 18-19 novembre 2010 et outre les partenaires du SIG Habitats fonctionnels de l'estuaire de la Seine du GIP et ceux du projet COLMATAGE, il a été ouvert à d'autres scientifiques développant des approches comparables dans d'autres sites estuariens ou côtiers afin d'enrichir les discussions.

### ***Séminaire 3 COLMATAGE développement Instrumental en Hydro-morpho-sédimentaire et en biocénotique en estuaire de la Seine : 15-16 juin 2011 à Caen***

L'Atelier 'Développement Instrumental en Hydro-morpho-sédimentaire et en biocénotique en estuaire de la Seine' s'est déroulé les 15 et jeudi 16 juin à Caen. Il a porté sur les points suivants : Instrumentation et développements en étude des fonds et habitats marins : acoustique, systèmes vidéos, SPI (Sediment Profil Imagery), carottages et autres techniques de prélèvement, archivage des données ; Instrumentation et développements d'outils d'enregistrements en continu des paramètres physico-chimiques, archivage des données ; Instrumentation et développements d'outils d'enregistrements en continu des paramètres morpho-sédimentaires, archivage des données et Instrumentation et développements d'outils d'observations spatiaux : images satellites, Laser Aéroporté (LIDAR), ortho-photographies, archivages des données.



### ***Séminaire 4 COLMATAGE, interne aux participants à la stratégie d'Observation, à long terme***

Ce séminaire consacré à la stratégie d'Observation, à long terme des compartiments étudiés dans COLMATAGE (environnement physique et sédimentaire), compartiment sédiment, compartiment macrofaune et compartiment ichtyofaune. Outre le point sur les acquis des 5 années du projet COLMATAGE et la façon de construire le rapport à 5 ans, il a été discuté des compromis (fréquences des observations, autres observations réalisées dans le secteur aval de l'estuaire par les grands ports..) à mettre en exergue dans le cas d'une stratégie d'étude à long-terme. Les approches sectorielles et stationnelles proposées dans le réseau REBENT pourraient également servir de base à un protocole qui ne pourra être défini que lorsque le travail d'exploitation des acquis COLMATAGE sera fini. Il pourrait être envisagé une action ciblée sur cet aspect dans Seine-Aval 5.

### **Campagnes de terrain**

Un des points forts de COLMATAGE, a été la réalisation de trois campagnes conjointes de fin d'été permettant à des sédimentologues, physiciens et biologistes (macrofaune et ichtyofaune) de faire des observations en même temps de façon à minimiser le facteur temps dans l'analyse des échantillons. Outre ces trois campagnes conjointes de fin d'été – début d'automne trois autres campagnes sédiment-benthos ont eu lieu en avril 2009 et 2010, puis en mars 2011. Des sorties en mer plus ponctuelles ont également été réalisées pendant le projet COLMATAGE notamment pour contrôler ou relever les Altus (Ifremer)

### ***Campagnes conjointes 2008, 2009 et 2010***

**COLMATAGE 2008.** La campagne COLMATAGE 2008 s'est déroulée à bord du Côte d'Aquitaine du 21/09/08 au 11/10/08. Elle a mobilisé 20 participants et a permis d'échantillonner : 1) 47 traits de chalut à perche pour l'étude des poissons et de la macrofaune selon la grille d'échantillonnage prévue - A chaque trait des paramètres hydrologiques ont été mesurés au fond et en sub-surface. Toutes les espèces ont été triées, identifiées avec dénombrement et pesée par taxon. Des contenus stomacaux ont été prélevés sur quatre espèces de poissons; 2) 19 stations pour l'analyse du benthos (5 réplicats par station à la benne Van Veen), de la granulométrie sous norme AFNOR (1 coup de benne supplémentaire

par station), de la matière organique et de la sédimentologie selon la méthode laser (1 coup de benne Schipeck par station); 3) 40 stations (positions recalculées en fonction du positionnement des traits de chalut de la campagne 1A) pour les mêmes analyses que précédemment (6 coups de benne Van Veen et 2 coups de benne Schipeck par station); 4) 11 stations visitées pour l'étude des foraminifères (carottier Reineck ou benne Schipeck). Deux Altus ont été posés (l'un devant le banc du Ratier et l'autre au sud de la zone de déblais du Kannik). Une station à *Ophiothrix fragilis* et une autre à *Owenia fusiformis* ont été filmées avec le ROV.

**COLMATAGE 2009.** La campagne COLMATAGE Benthos 2009 s'est déroulée à bord du Côtes de la Manche du 26 août au 3 septembre 2009; elle a mobilisé 10 participants. Un total de 46 stations a été prélevé, deux situées en amont de la fosse nord et une en fosse sud à faible profondeur n'ont pu être échantillonnées en raison du tirant d'eau du CdM. Les deux stations situées en amont de la fosse nord n'ont pas pu être visitées en septembre 2009 lors de la campagne chalutage à bord du Sepia, seule celle en fosse sud a été échantillonnée. Les opérations suivantes ont été réalisées: 1) Benne Van Veen partie 46 stations; 2) benne shipeck, 27 stations (S. Lesourd), 3) ROV transect depuis l'estuaire de la Seine jusqu'au large 4) Flux aux interfaces sur deux stations l'une face à l'estuaire de la Seine (positionnement à déterminer à l'issue des prélèvements à la benne Van Veen) et l'autre sur le peuplement à *Ophiothrix fragilis* au large du cap d'Antifer; 5) Foraminifères, prélèvement au carottier Reineck sur 5 stations de la partie orientale de la baie de Seine. Stations 7, 10, 15, 28 et 40 (points Alizier) et 6) Relevage de deux bouées de repérage des ALTUS Ifremer. Les échantillonnages halieutiques au chalut à perche ont été réalisés à bord du Sépia II du 26 au 30 septembre (6 participants). Deux stations échantillonnées en 2008, n'ont pas été accessibles ce sont donc 44 stations qui ont été chalutées dans un secteur compris entre Ouistreham et Antifer et s'étendant du pont de Normandie jusqu'à la sonde des 20 m. A chaque trait des paramètres hydrologiques ont été mesurés au fond et en sub-surface. Toutes les espèces ont été triées, identifiées avec dénombrement et pesée par taxon.

**COLMATAGE 2010.** La troisième et dernière campagne COLMATAGE a eu lieu en fin d'été du 26 août au 11 septembre (17 jours d'embarquement) a mobilisé 20 scientifiques et a réuni des équipes du LOG, de l'Ifremer Port-en-Bessin, de Nantes, de Plouzané Brest et de Boulogne, du LOG, de M2C et de la CSLN sur le Côtes de la Manche. Les opérations suivantes ont été réalisées: 1) chalutage des mêmes stations qu'en 2009 (26 au 30 août) et

même opérations d'échantillonnage ; 2) échantillonnage de 19 stations dont 12 uniquement macrofaune sur la grille 2008 et 2009. En effet, après discussion entre les benthologues et les halieutes, il a été proposé une mutualisation des efforts d'échantillonnage et de dépouillement avec d'autres opérations contractuelles (GPMR et GPMH) réalisées en automne 2010 par le CSLN. Seules 12 stations non couvertes dans la partie occidentale de la grille de Deauville à Ouistreham ont donc été échantillonnées pendant cette campagne ; 3) macrofaune benthique, suivi des stations de sables fins envasés, des sables moyens dunaires et des graviers à *Ophiothrix* ; 4) vidéo à l'aide du mini ROV Seabotix ; 4) suivi des 27 stations de sédimentologie (S. Lesourd) ; 5) suivi des stations foraminifères (financement hors COLMATAGE) ; et 6) pose d'Altus et opérations de turbidité par l'équipe de l'Ifremer Brest-Plouzané.

### ***Campagnes printanières 2009 et 2010***

La campagne printanière 2009 s'est déroulée sur le Côte de la Manche du 17 au 30 avril (13 jours d'embarquement) a mobilisé 14 scientifiques et a réuni des équipes du LOG et Intechmer-Cnam de Cherbourg. Les opérations suivantes ont été réalisées : 1) prélèvements à la benne Van Veen (deux zones à explorer dans la partie orientale de la baie de Seine et au large, 2) ROV Seabix LBV 200 L<sup>2</sup> : 3) couverture sédimentaire de la baie de Seine, 250 stations Shipeck et 4) suivi de la zone à *Ophiothrix* du large d'Antifer.

La campagne printanière 2010 s'est déroulée sur le Côte de la Manche du 21 avril au 3 mai (13 jours d'embarquement) a mobilisé 16 scientifiques et a réuni des équipes du LOG, de l'Ifremer Plouzané-Brest, de l'Ifremer Dinard et Intechmer-Cnam de Cherbourg. Une équipe d'Angers travaillant sur les foraminifères a été invitée. Les opérations suivantes ont été réalisées : 1) macrofaune benthique, suivi des stations de sables fins envasés, des sables moyens dunaires et des graviers à *Ophiothrix* ; 2) vidéo à l'aide du mini ROV Seabotix ; 3) suivi des 27 stations de sédimentologie (S. Lesourd) ; 4) étude d'érodimétrie (équipes Ifremer Brest et Dinard) ; 4) suivi des stations foraminifères (financement hors COLMATAGE) ; et 5) diverses opérations de l'Intechmer-mer sur le site atelier du nord-ouest d'Antifer.

### ***Campagne Pectow mars 2011***

La dernière campagne COLMATAGE-PECTOW a été réalisée du 9 au 16 mars 2011 sur le Côtes de la Manche ; elle a mobilisé 14 scientifiques du LOG Wimereux, M2C Caen et

Station Biologique de Roscoff. C'est une opération qui consiste à faire trois prélèvements à la benne Hamon par station dont deux pour la faune (2 mm) et un pour la granulométrie sur un réseau de 75 stations. Deux autres opérations récurrentes ont également été réalisées pendant cette campagne hivernale : suivi des 27 stations de sédimentologie (S. Lesourd) et suivi des stations foraminifères.

Un effort conséquent d'échantillonnage et de mobilisation des équipes sur le terrain a donc été mené de 2008 à 2011 dans le projet COLMATAGE ; le tableau ci-dessous récapitule les différentes opérations.

	08/08	04/09	08/09	04/10	08/10	03/11
Chalutages	<b>47</b>	-	<b>44</b>	-	<b>44</b>	-
Stations benthos Van Veen	<b>56</b>	-	<b>48</b>	-	<b>12</b>	-
Stations benthos Hamon	-	-	-	-	-	<b>73</b>
Stations foraminifères Reineck	<b>11</b>	-	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Stations sédimentologie Shipeck*	<b>58</b>	-	<b>77</b>	<b>30</b>	<b>29</b>	<b>37</b>
Cartographie sediment Shipeck	-	<b>296</b>	-	-	-	-
Altus						
Mon ROV Sea Botix						
Stations Intechmer						

- plus 31 stations à la benne Smith Intyre réalisée du 29 novembre au 3 décembre 2010 à bord du Marais (GMPR) en collaboration avec la CSLN.

## RESULTATS SCIENTIFIQUES DETAILLES

### 1. Recensement et organisation des bases des données historiques

#### 1.1 Sédiment

##### 1.1.1. Base de données SEDIMENT

Le programme COLMATAGE a été l'occasion de la mise en place d'une base de données sédimentologiques regroupant les informations des différents laboratoires participant au projet. La mise en place de cette base de données obéit à plusieurs objectifs :

- rassembler les informations dispersées,
- uniformiser leur présentation,
- améliorer leur disponibilité,
- permettre leur pérennisation,
- vérifier et caler des modèles numériques.

La bancarisation numérique de données réclame à ce qu'une réflexion soit menée pour définir le type et la nature de l'information qui va être stockée. Cette étape de la création d'une base de données numérique est qualifiée de structuration des données, et est guidée principalement par deux contraintes antinomiques : 1) que le maximum d'informations puisse être stockées 2) que l'ensemble des informations enregistrées soient les plus « légères » possible en terme d'espace de stockage (minimum d'espace).

Lors de la participation au PNEC « Baie de Seine », le groupe GEOCEANO a mis en place une base de données sédimentologiques permettant de regrouper les différentes informations acquises par leur groupe de recherche sur la baie de Seine. Avec cette première mouture, il a été souhaité d'être exhaustif autant que cela était possible pour la conservation de l'information à la fois de terrain et celle issue des analyses. L'utilisation pratique de cet outil et la confrontation avec les données sédimentologiques des groupes de recherche partenaires a montré qu'un volume non négligeable d'informations n'était pas toujours disponible.

La masse de données sans cesse croissante a amené à proposer une refonte de la BDD existante. Les multiples intérêts portés à cet outil de gestion par les partenaires du programme Colmatage, a permis de réaliser cette évolution en tenant compte d'avis divers et variés aussi bien en tant que fournisseurs de données que d'utilisateurs. Les améliorations apportées ont eu comme objectifs :

- de permettre une plus grande simplicité de la saisie des données en limitant le nombre de champs à remplir, tout en conservant le maximum d'informations utiles,
- de structurer les bases de données de façon à ce qu'elle puisse se connecter à d'autres bases de données (par exemple MABES) et que l'ajout d'informations supplémentaires soit possible,
- d'intégrer la dimension spatiale en permettant une visualisation de l'information au travers d'outils SIG.

Un nouveau travail de structuration de l'information a été mené pour intégrer à la fois l'expérience de la première version de la base de données et les nouvelles contraintes technologiques et techniques. Les améliorations se sont basées sur la mise en œuvre des outils SIG libre et le suivi des spécifications OpenGIS. Ces choix permettent de s'affranchir de l'acquisition de licence de logiciels dédiés parfois coûteux. Il est ainsi laissé toute liberté à chaque composante du projet d'utiliser ses propres outils tout en gardant une accessibilité maximum aux données, sans contraintes sur les formats d'échanges de données.

La mise en commun de données sédimentaires provenant de divers laboratoires, acquises et traitées de manière différente, réclame à ce que parmi les données stockées, soient conservées celles qui permettent de signifier ces différences. La base de données constitue, par essence, un rassemblement de données disparates en dépit de l'uniformisation de leur format. En effet, les techniques de prélèvements utilisées, les méthodes de conservation des échantillons, les techniques d'analyses... sont autant d'informations qualifiées de « meta-données », qui permettront d'exploiter au mieux les données granulométriques, données centrales d'une base de données sédimentaires. Il convient donc de garder la trace de cette diversité de provenance des données, afin de prendre en compte les spécificités au moment de leur exploitation.

La base de données **SEDIGEST** ainsi constituée est formée de huit tables relationnelles (Figure 1), qui ont été définies en rassemblant les données relatives à :

- la campagne de prélèvements sur le terrain,
- le point géographique où a été effectué le prélèvement,
- le ou les échantillons conservés au point d'échantillonnage,
- la granulométrie des sédiments de chaque échantillon,
- le protocole d'analyse granulométrique mis en œuvre,
- la technique de prélèvement utilisée.





**Figure 1.** Structure de la base de données SEDIGEST.

Les relations définies entre les tables de la base de données relationnelles permettent de stocker à la fois les données d'un unique échantillon en un point de l'espace géographique, mais aussi les données de plusieurs échantillons au même point, comme cela est nécessaire dans le cas d'un carottage par exemple. Ce sont 25 missions (entre 1985 et 2012) qui ont été recensées (Tableau 1) et les données granulométriques obtenues sur les échantillons prélevés (plus de 1100) au cours de ces missions ont été saisies dans la base de données SEDIGEST.

Pour l'ensemble des missions répertoriées dans le tableau 1, l'offset (la distance) séparant l'antenne de radio-positionnement de l'axe vertical du système de prélèvement est prise en compte. Ce n'est pas le cas général pour les missions réalisées par les scientifiques quelle que soit leur spécialité. A titre d'exemple, en fonction des navires utilisés, l'offset longitudinal peut atteindre plus d'une vingtaine de mètres et donc être d'un ordre supérieur à la précision du système de radionavigation. Au cours des campagnes de prélèvement menées en baie de Seine, plusieurs systèmes de radio-positionnement ont été mis en œuvre en fonction de l'équipement des navires utilisés et de l'évolution des techniques de radio-positionnement (pour chacune des techniques mises en œuvre, la précision moyenne, en mètre, du positionnement des échantillons, voir annexe 1). Les échantillons qui peuvent être pris en considération pour étudier la variabilité spatio-temporelle des sédiments fins en baie de Seine,

doivent avoir été positionnés avec des systèmes de précision identique. Pour l'étude, les échantillons positionnés au moyen d'un DECCA ne peuvent donc pas être pris en compte. La précision des autres systèmes de radio-positionnement est de l'ordre de la centaine de mètres (Toran, GPS SA et naturel) ou de la dizaine de mètres (SYLEDIS, DGPS). La précision s'améliorant sans cesse avec les GPS différentiels, les GPS cinématiques (RTK) et le futur système européen GALILEO, il a donc été, dans un premier temps étudié la variabilité géographique à l'échelle métrique et dans un deuxième temps à l'échelle de la centaine de m.

Mission	Date
Biogéophy 2	mai-1986
SUIV11	juin-1986
Biogéophy 1	sep-1986
SUIV12	oct-1986
Biogéophy 3	fév-1987
Biogéophy 4	avr-1987
Biogéophy 5	nov-1987
SUIV13	avr-1988
Biogéophy 6	mai-1988
SUIV14	oct-1988
SUIV15	déc-1988
PlancSeine 1	juin-1989
TPINT89	juin-1989
SUIV16	nov-1989
Fluxmanche 2	juil-1991
Epshom 1	oct-1991
Benthoseine 98	sep-1998
Benthoseine 99-2	mai-1999
Vastedeba 1a	fév-2000
Vastedeba 2	mai-2001
SUIV17	juin-2001
BENSEI09	fév-2009
COL9	avr-2009
COL10	mai-2010
BENSEI10	juin-2010

**Tableau 1.** Missions réalisées en baie de Seine et dont les données granulométriques disponibles ont été intégrées dans la BDS1.

Le groupe de recherche GEOCEANO ayant déjà fait l'effort de réflexion et réalisation pour ces propres besoins d'une base de donnée, ce travail a servi de base de réflexion pour la définition et création de la base de données du GIP Seine Aval, qui, à terme, doit regrouper l'ensemble des données sédimentologiques en baie de Seine de tous les laboratoires participant au programme COLMATAGE. De nombreuses discussions ont eu lieu au cours des séminaires mis en place dans le cadre du programme «colmatage» qui se sont déroulés en 2007 et 2008 dans les locaux du GIP Seine Aval à Rouen. Dans une première étape, pour faciliter d'une part les premiers échanges et pour d'autre pouvoir avoir une idée des différences mais aussi similitudes entre les informations des différents laboratoires, un format texte de type tableau a été retenu. En parallèle, l'analyse croisée du format de la base de

donnée SEDIGEST et des premiers fichiers textes reçus des groupes de recherche, a permis de définir la structure de la base de données sédimentologiques du GIP Seine Aval.

### 1.1.2. Variabilité des données sédimentologiques

Fort de cette base de données, le travail réalisé dans COLMATAGE a cherché à mettre en évidence la variabilité géographique du taux de fraction fine à l'échelle du prélèvement et plus exactement à l'échelle de la précision du système de positionnement. Un bref rappel du niveau de précision proposé par les différents systèmes de positionnement mis en œuvre au cours des 20 dernières années. Dans le cas du programme «Colmatage», la base de données sédimentologiques mise en place intègre des données obtenues entre 1985 et 2010 ; au cours de cette période de temps, les techniques de positionnement en mer ont largement évolué et permettent d'améliorer constamment la précision du prélèvement. Cette base de données rassemble aussi des prélèvements qui ont été réalisés en mettant le navire support à l'ancre. La précision du positionnement se trouve donc théoriquement encore meilleure.

Pour comparer des données géoréférencées que ce soit dans l'espace ou dans le temps, il est important de connaître la variabilité spatiale afin d'en tenir compte dans les interprétations finales. La grande variabilité des techniques de positionnement utilisées et les objectifs très différents des différentes missions dont les données sont centralisées dans la base Colmatage, amène à étudier la variabilité géographique du taux de fraction fine à différentes échelles spatiales, ainsi que sur la stratégie d'échantillonnage (réplicats, radiales et grille), tout comme la variabilité liée à la technique de prélèvement (voir Rapport de GEOCEANO donné en annexe).

En conclusion de cette étude sur la variabilité, il apparaît que l'étude de l'influence des différentes techniques de prélèvement sur le taux de fraction fine du sédiment prélevé doit être réalisée en comparant chacune des techniques avec une technique servant de référence. Dans ce cas, ce sont les prélèvements réalisés par plongeur qui servent de référence. Il faut quand même garder à l'esprit que la variabilité spatiale du taux de fraction fine doit être prise en considération. Pour le plongeur, la variabilité spatiale est de l'ordre du m ; pour les autres techniques, les prélèvements étant réalisés bateau à l'ancre, la variabilité spatiale est estimée à une vingtaine de m.

Les résultats obtenus montrent que les faciès granulométriquement hétérogènes comme les vases graveleuses ne peuvent servir dans le cadre de ce type d'étude. En effet, le taux de fraction fine est déterminé par tamisage humide et donc le résultat est exprimé à travers un

rapport de masse. La présence d'un nombre plus ou moins important de graviers voir de débris coquilliers a une influence énorme sur le résultat rendant impossible toutes comparaisons.

La superposition verticale de faciès dont les caractéristiques géotechniques sont très différentes ne permet pas non plus ce type d'étude. En effet, la couche de surface a une épaisseur très variable due à des variations très localisées de la topographie (bioturbation...) et la différence de propriétés mécanique des couches favorise une séparation entre elles et donc une mauvaise conservation. Dans ce cas de figure, seul un prélèvement effectué, dans les règles de l'art, au moyen d'un carottier Reinek permet d'obtenir des taux de fraction fine tout à fait comparables avec ceux obtenus sur les sédiments prélevés par les plongeurs.

L'étude des faciès sédimentaires homogènes tels que les vases sableuses et les sables envasés permettent de préciser plusieurs points quant à l'influence des techniques de prélèvement sur la conservation du taux de fraction fine. Il apparaît que statistiquement, il n'existe pas de différences significatives en ce qui concerne les moyennes des taux de fraction fine obtenus sur des échantillons prélevés au moyen d'un carottier Reinek ou par une benne qu'elle soit de type van Veen, Shipek ou Smith-Mc Intyre. Il est montré la persistance d'une organisation séparant d'un côté les prélèvements réalisés par le plongeur, les prélèvements réalisés par carottage Reinek et les prélèvements réalisés par benne. Dans les deux cas, le carottier Reinek illustre la variabilité spatiale de chaque faciès à l'échelle de la vingtaine de mètres. Celle ci est d'environ deux fois supérieure pour les deux faciès. Les bennes, quant à elles, présentent des distributions moins dispersées ce qui, au regard de leur dispersion spatiales identique à celle du Reinek, peut être considéré comme une anomalie. Tout se passe comme si les bennes lissaient cette variabilité géographique. Il n'est cependant pas possible d'illustrer une quelconque influence de la technique mise en œuvre sur les valeurs moyennes de fraction fine. La variabilité géographique des sites étudiés est d'un ordre supérieur masquant toute variabilité d'ordre technologique.

Au terme de cette étude, il ne faut pas oublier que les comparaisons des taux de fraction fine réalisés sur différents faciès sédimentaires et sur des échantillons prélevés par différentes techniques n'ont été rendues possibles que parce que les prélèvements ont été réalisés par beau temps avec une mer plate. Il est certain que, dès que la mer se lève, il est très difficile de maîtriser les différentes étapes du prélèvement et de l'échantillonnage. Cette mauvaise maîtrise influe bien évidemment sur la note de qualité que l'on peut affecter à un résultat lorsqu'il est collationné au sein d'une base de données. Ainsi, il ne semble pas déraisonnable

de rajouter dans les métadonnées d'une base de données sédimentologiques des informations relatives au bon déroulement des opérations de prélèvement en mer.

Un second objectif poursuivi concerne l'optimisation de la mise en œuvre des bases de données sédimentologiques. Depuis que le sédimentologue réalise des échantillonnages en mer les méthodes de positionnement géographique n'ont pas cessé d'évoluer vers des conditions toujours meilleures. La base de données sédimentologiques DBS1 rassemble les données sédimentologiques obtenues par le groupe GEOCEANO depuis 1985. Forte de plusieurs milliers d'échantillons, elle autorise aussi bien des études spatiales que temporelles. Pour optimiser son utilisation, il est donc important de quantifier pour chaque échantillon pris en compte la variabilité spatiale à l'échelle de la précision du système de positionnement. En baie de Seine, des tests ont été menés pour les principaux environnements sédimentaires avec un navire à l'ancre (précision du DGPS) ou dans des carrés délimités de 100 m de côté. Les résultats ainsi obtenus ont été appliqués lors de l'étude de l'influence du dépôt de dragage d'Octeville sur l'envasement de la baie de Seine orientale. Ce travail a été complété par une approche géostatistique qui amène à la prise en compte de la nécessaire adéquation entre l'échelle du phénomène étudié, le plan d'échantillonnage et le nombre de réplicats à prendre en compte.

Au terme de cette étude basée sur l'application des principes de l'Assurance Qualité en sédimentologie, le sédimentologue a maintenant à sa disposition une illustration concrète des différents problèmes qui peuvent apparaître tout au long de la chaîne analytique et ceci de la création du plan d'échantillonnage jusqu'à l'interprétation « clé en main » fournie par les systèmes d'analyse les plus récents. Dès lors, il pourra accorder une note de confiance aux résultats analytiques qu'il doit interpréter. Le sédimentologue a maintenant la possibilité de borner le taux de fraction fine qu'il a déterminé ( $X \% \pm x\%$ ). Il lui reste cependant à prendre en compte ou ne pas prendre en compte cette variabilité dans ses interprétations. Cette décision lui appartient comme il lui appartient de réaliser un prélèvement ou plusieurs réplicats. La connaissance de la « précision » du taux de fraction fine lui offre la possibilité de faire la différence entre les variabilités du taux de fraction fine liées à une option prise lors du schéma analytique (de la conception du plan d'échantillonnage à l'interprétation) et les variabilités naturelles qu'il cherche à mettre en évidence. Il apparaît maintenant nécessaire de repenser les bases de données sédimentologiques afin d'y intégrer des champs importants, représentant des choix cruciaux pour la validité du résultat, et qui jusqu'à aujourd'hui ne sont jamais pris en compte. De nombreux concepts interprétatifs devront être revus afin de tenir compte de l'évolution des techniques. Ainsi, les schémas interprétatifs, les formules, plus ou

moins empiriques, les classifications établies avec des données obtenues par tamisage ne peuvent continuer à être utilisées en intégrant des valeurs données par un diffractomètre laser.

### **1.2. Base de données MACROBENTHOS (MABES 3)**

MABES 2 (données quantitatives) pour le benthos a été enrichi aux données de biomasses, elle est maintenant opérationnelle adossée à CISA (référentiel taxonomique pour les invertébrés sur la zone d'étude) pour toutes les données historiques. Elle devrait s'enrichir des données les plus récentes acquises notamment par la CSLN sur des financements des GPMR et GPMH, puis les données des campagnes macrobenthos COLMATAGE 2008, 2009 et 2010, tâche qui reste du ressort du GIP Seine-Aval.

### **1.3. Base de données ICTHYOLOGIE**

Toutes les données de campagnes Ifremer (1995-2002 et 2008-2010) seront archivées au GIP Seine-Aval, mais il n'a pas été effectué pour le moment de compilation des données Ifremer et CSLN.



## 2. Etat actuel et évolution à long-terme de l'estuaire moyen et l'estuaire aval

L'accumulation de connaissances a permis d'étudier l'évolution à long-terme de quelques zones ou habitats particuliers de la zone estuarienne comprise entre la Risle et la partie orientale de la baie de Seine dans le périmètre défini comme l'estuaire aval.

### 2.1. La couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine : situation 2008-2010

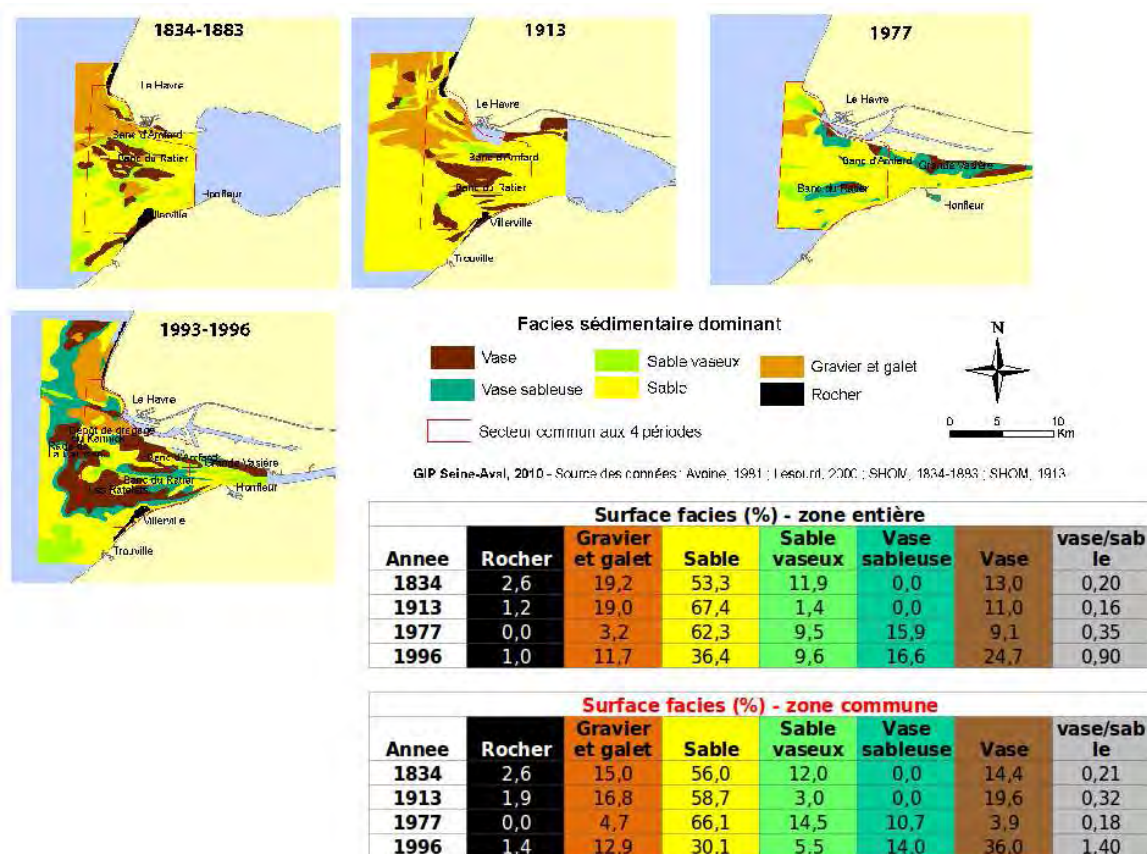
#### *Contexte de l'approche sédimentaire*

Depuis les 30 dernières années, l'anthropisation de l'estuaire de la Seine conduit à de profondes modifications morphologiques dont les conséquences ont été étudiées : réduction de l'espace disponible, réduction des surfaces intertidales, réduction du volume de l'estuaire, migration du dépôt-centre de la sédimentation vers l'aval, envasement significatif de l'estuaire aval, ceci dans le cadre d'une dynamique des sédiments fins complexe (Avoine, 1981 ; Lesourd, 2000 ; Lesueur 2003 ; Delsinne, 2005 ; Guezennec, 1999 ; Deloffre, 2005 ; Garnaud, 2003). Dans le cadre de l'Axe III « Système d'Observation » du programme Seine Aval phase 4, un suivi à long terme des caractéristiques sédimentologiques de l'estuaire est indispensable, ne serait ce que pour juger des conséquences des travaux de Port 2000 et des mesures compensatoires associées.

Un des objectifs de Colmatage est ainsi d'établir un nouveau bilan de la couverture sédimentaire, suite notamment à la modification morphologique de la fosse Nord (Travaux Port 2000, creusement d'un nouveau chenal en amont, déplacement de la brèche en amont du Pont de Normandie, construction d'un épi), fosse par ailleurs identifiée comme une zone de stockage temporaire de sédiments fins (Lesourd *et al.*, 2003). Des modifications significatives ont déjà été mises en évidence sur cette zone, où des faciès vaseux francs ont laissé place à des faciès de sables moyens (Thèse AL Janson, 2006, Seine Aval III).

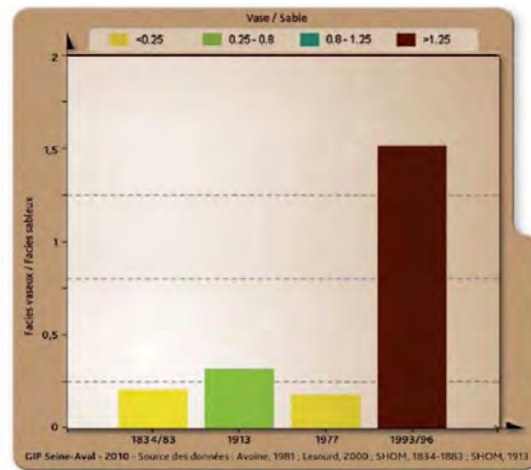
Dans ce contexte, l'évolution de la couverture sédimentaire à l'échelle pluriannuelle apparaît comme un indice caractéristique de l'évolution morphologique de l'estuaire. Les études antérieures ont permis un état des lieux de la répartition des faciès sédimentaires selon quatre périodes : XIX<sup>ème</sup> siècle (environ 1850, données SHOM), 1913 (données SHOM), 1979 (Avoine, 1980) et la période 1993 – 1996 (Seine Aval phase I). Ces cartes ont mis en évidence une nette évolution des faciès sableux vers des faciès sablo-vaseux puis vaseux, évolution en relation étroite avec l'anthropisation de l'estuaire (Lesourd, 2000, Lesourd *et al.*, 2001) dans un contexte de variation saisonnière de la sédimentation (Lesourd *et al.*, 2003).

Une synthèse intéressante des données cartographiques, publiée dans une fiche thématique de Seine Aval (C. Fisson, GIP Seine-Aval 2011) permet de mettre des résultats anciens sous un jour nouveau. Suite au géo-référencement des cartes, la proportion de surface couverte par chaque faciès sédimentaire a été déterminée. Une surface commune a été délimitée afin d'avoir des éléments de comparaison cohérents. Sur chaque carte la zone commune est représentative de la zone entière (Figure 2).



**Figure 2.** Cartographie sédimentaire à l'embouchure de la Seine pour quatre périodes et calcul des surfaces correspondantes. La typologie retenue représente le faciès sédimentaire dominant, selon la part de sédiments fins ( $<50\mu\text{m}$ ) : sable ( $<5\%$ ), sable vaseux (5-25%), vase sableuse (25-75%), vase ( $>75\%$ ). Document GIP Seine Aval.

Un indicateur pertinent, correspondant au rapport entre la surface à dominante vaseuse (faciès vaseux et vaso-sableux) et la surface à dominante sableuse (faciès sableux à sablo-vaseux), a été calculé à partir des surfaces communes (Figure 3).



**Figure 3.** Variation du rapport vase/sable à l'embouchure de la Seine (GIP Seine-Aval 2011)

Cet indicateur met nettement en évidence l'augmentation de la fraction vaseuse dans la couverture sédimentaire, entre 1977 et les années 1993-1996. Il met également en valeur la pertinence et la cohérence des données anciennes malgré des techniques d'échantillonnage et d'analyse différentes (plomb suifé et observation pour les années 1834/83 et 1913, benne et tamisage pour les années 1977 et 1993-96).

## 2.2. Matériel et méthode pendant COLMATAGE

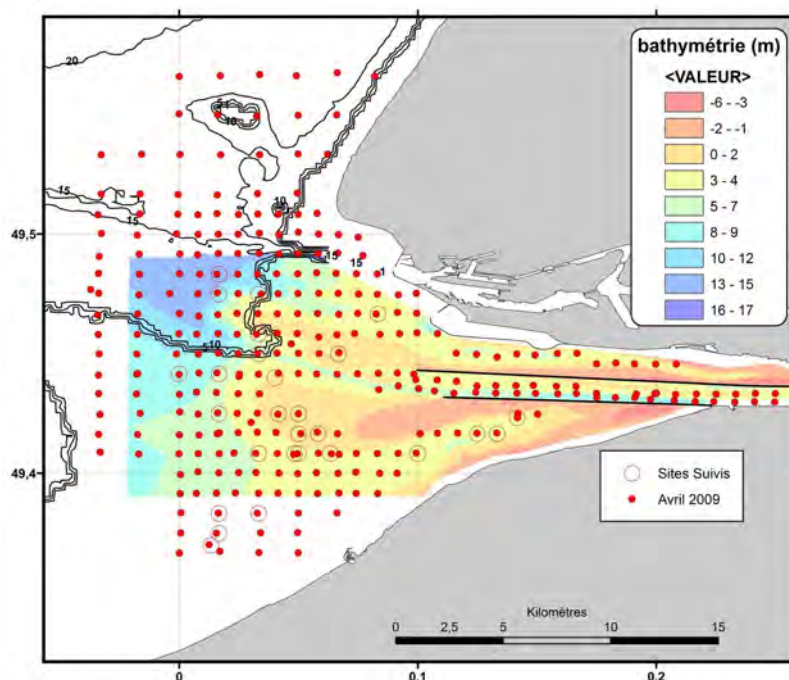
Un ensemble de 530 échantillons a été prélevé sur l'essentiel de l'estuaire, sur les zones couvertes par les missions Seine Aval précédentes (de Tancarville jusqu'à une ligne Le Havre – Ouistreham). La pertinence de l'échantillonnage repose sur une connaissance précise des fonds de l'estuaire, basée sur un ensemble de 3600 échantillons prélevés depuis 1993 [Campagnes Sedibaie (1993, 1994), Sedise (1995), Seawain (1995), Seine Aval (1996-1999), Vastedeba (2000-2001) et Cysava (2005)].

La mission principale (avril 2009, Figure 4), dédiée uniquement à la sédimentologie, a permis de récolter 316 échantillons (dont 10 carottes) sur un pas d'environ 1 point par demi-mille, selon un carroyage cohérent. Sur la plupart des missions d'échantillonnage, un leg était prévu pour ré-échantillonner un réseau de 27 stations (SS "sites suivis") dans l'objectif de juger de la variabilité saisonnière de la sédimentation (Figure 5). Les missions benthos ont donné l'opportunité de collecter des échantillons complémentaires, sur la base de la benne Shipeck destinée au prélèvement de matière organique. Lorsque cela était pertinent (faciès non détruit), un échantillon a été collecté à partir de la benne Van Veen (Figure 6).

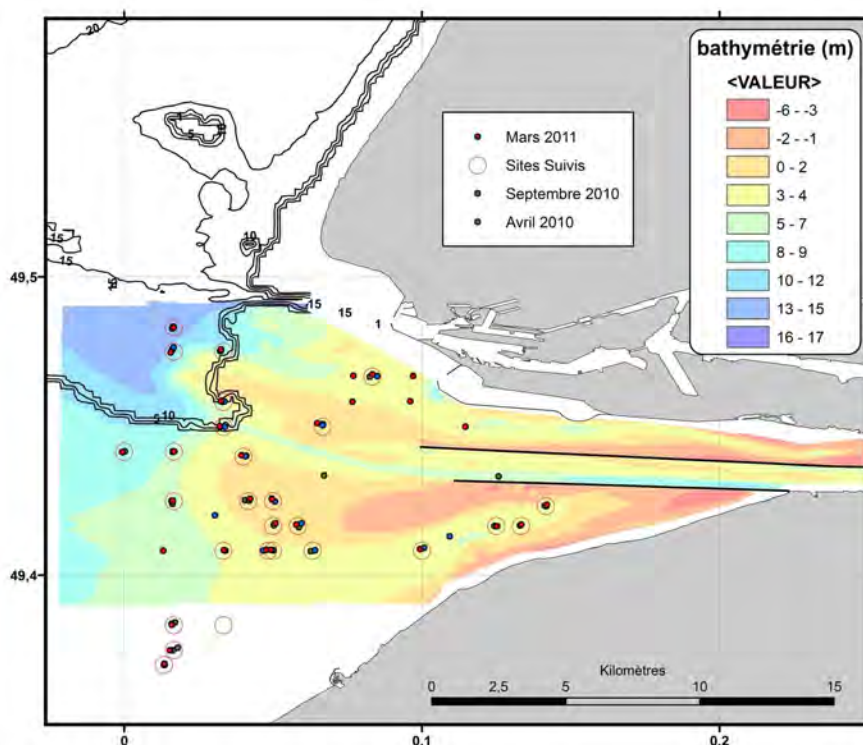
Un set complémentaire de données a été fourni par la CSLN (données collectées et analysées dans le cadre d'un suivi du GPMH). Ce set de données permet de compléter la couverture vers le NE de la Baie de Seine. La cartographie repose ainsi sur l'étude de 561 échantillons. Soulignons la bonne cohérence des données CSLN avec les autres, et ce malgré des engins de prélèvements différents. Les zones de recouvrement des sets de données montre des teneurs en fines différents seulement de quelques %.

Chaque échantillon a fait l'objet d'une photographie et d'une description. Des répliquats ont été effectués lorsque l'échantillon n'était pas satisfaisant (perturbation, benne vide). Des sous échantillons ont été réalisés en fonction de la structure sédimentaire. Un nombre significatif de bennes vide est interprété comme fond dur. Du point de vue de l'étude granulométrique, un choix méthodologique a été réalisé en fonction de la nature des sédiments. Lorsque l'échantillon comprenait des fractions supérieures à 2 mm (visible lors de la description, où lors de l'ouverture du sac), une analyse sur colonne AFNOR 15 tamis a été réalisée selon un protocole standard. Sinon, les analyses ont été réalisées au microgranulomètre laser Coulter LS 230 (0,4 $\mu$ m à 2mm, LOG) en suivant les préconisations constructeur. Les analyses de la CSLN ont été réalisées avec un LS 230 (0,04  $\mu$ m à 2mm, M2C Caen).

Les cartes élaborées utilisent deux sources de données bathymétriques : GMPR 2009 (partie estuarienne) et SHOM 1997 (partie Baie de Seine). La partie Baie de Seine ne bénéficie que d'une bathymétrie déjà ancienne (1997) bien que soumise à moindre variation. La jonction entre les deux jeux de données pose ainsi problème au niveau de l'embouchure. Les deux types de données sont présentés séparément pour éviter toute confusion.

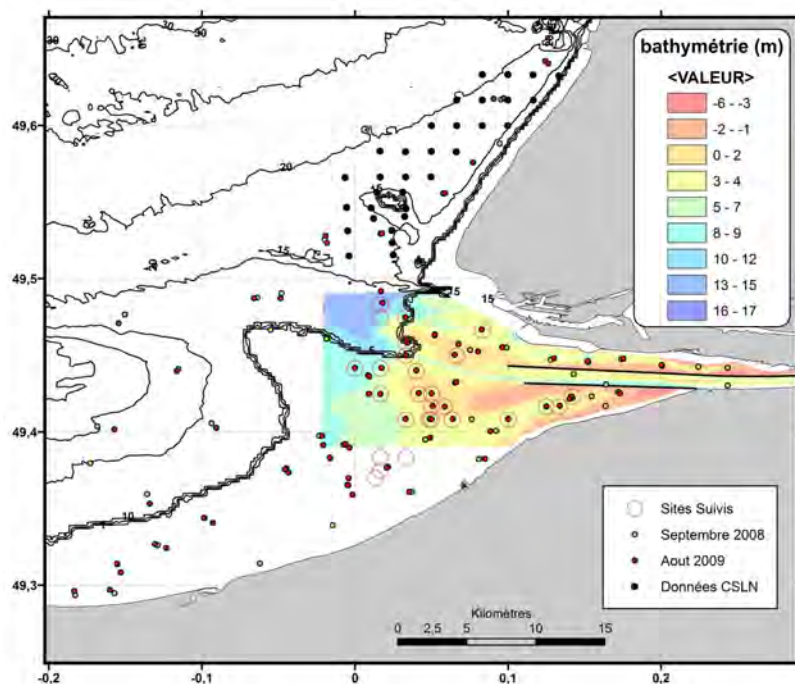


**Figure 4.** Cartographies des points échantillonnés lors de la campagne d'Avril 2009. Repère en Degré décimal WGS84. Les données bathymétriques manquant de cohérence, et afin d'alléger la figure, elles sont présentées de 2 manières distinctes (GPMR 2009 en couleur, SHOM 1997 en isobathes).



**Figure 5.** Cartographies des points échantillonnés lors des campagnes d'avril 2010, de septembre 2010 et de mars 2011. Repère en Degré décimal WGS84. Les données bathymétriques manquant de cohérence, et afin d'alléger la figure, elles sont présentées de 2 manières distinctes (GPMR 2009 en couleur, SHOM 1997 en isobathes).





**Figure 6.** Cartographies des points échantillonnés lors des campagnes de septembre 2008, d'août 2009 et positions des points CSLN (décembre 2010). Repère en Degré décimal WGS84. Les données bathymétriques manquant de cohérence, et afin d'alléger la figure, elles sont présentées de 2 manières distinctes (GPMR 2009 en couleur, SHOM 1997 en isobathes).

Les données granulométriques ont fait l'objet d'une classification basée sur la description de faciès et sur celle de Larssonneur (1971) (Tableau 2), dans l'optique d'avoir des critères de comparaison comparables avec les données antérieures.

**Tableau 2.** Classification de Larssonneur modifiée. Chiffres exprimés en % de la fraction totale. md = médiane - maj = majoritaire - G : galet > 2cm - Gr : graviers 2 cm à 2 mm - Sg : sable grossiers 500  $\mu$ m à 2 mm - Sm : sables moyens 200 à 500  $\mu$ m- Sf sables fins 50 à 200  $\mu$ m - V : vases < 50  $\mu$ m.

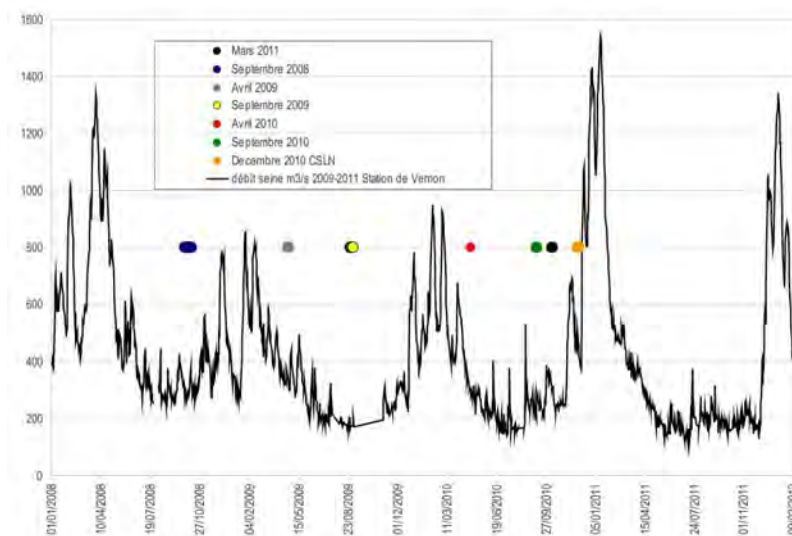
G+Gr>50 V<5 Md>2mm	G>50	G>70	Cailloutis	C
		50<G<70	Cailloutis graveleux	CGr
	G<50	15<G<50	Gravier caillouteux	GrC
		G<15	Gravier	Gr
S+V >50 V<5 Md<2mm	15<G+Gr<50	G>Gr	Sable caillouteux	SC
		G<Gr	Sable graveleux	SGr
	G+Gr <15	Sg maj	Sable grossier	Sg
		Sm maj	Sable moyen	Sm
		Sf maj	Sable fin	Sf
V>5	V<25		Sable vaseux	SV
	25<V<75		Vase sableuse	VS
	V>75		Vase	V



L'étude faciologique des dépôts reste fondamentale pour l'étude la répartition de la couverture sédimentaire. En effet, une classification réalisée uniquement à partir des coupures granulométriques ne tient pas compte des spécificités du sédiment, notamment la cohésion des vases, appréhendée qualitativement dans cette étude. Ainsi, certains faciès susceptibles d'être classés "vase" (+ de 75 % de fraction inférieure à 50  $\mu\text{m}$ ) sont en fait des faciès de vases compactes noires anciennes, mise à nu lors de l'érosion. Leur signification du point de vue de la sédimentologie est tout autre que des vases fluides caractéristiques du fonctionnement hydrosédimentaire actuel de l'estuaire. Par ailleurs, certains échantillons sont classés fonds durs ; ce sont (1) soit des fonds caractérisés par l'absence de matériel sédimentaire, malgré de nombreux réplicats (fonds durs dits indifférenciés, et globalement des rochers et blocs), (2) soit des fonds de vase noires très compactes (Cu de l'ordre du  $\text{KN.m}^{-2}$ ) formant une semelle sur laquelle est susceptible de transiter du sédiment, sable ou vase plus molle.

### 2.3. Contexte hydrologique

Les missions COLMATAGE se sont déroulées dans un contexte de débit fluvial caractérisé par un étiage prolongé qui se prolonge depuis une dizaine d'année. En effet, si quelques évènements de crue (i.e débit liquide supérieur à  $800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) ponctuels sont survenus durant les dernières années, ces forts débits fluviaux ont été suffisamment peu soutenus dans le temps pour occasionner des conséquences hydrosédimentaires, telle une crue estuarienne (Lesourd *et al.*, 2003 ; Garnaud *et al.*, 2003). Durant les missions colmatage, le débit liquide a rarement atteint les  $800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (Figure 7).



**Figure 7.** Le contexte hydrologique des missions colmatage. Débit fluvial mesuré à Vernon.

Du point de vue de la météorologie, quelques événements sont survenus : une mer agitée avant la mission de août 2010, la mer était peu agitée en septembre 2010, à agitée en mars 2011. Les autres missions se sont déroulées dans des conditions de mer très calme, particulièrement pour la mission "sédimentologie" d'avril 2009 où sévissait une mer 'd'huile' par un coefficient de marée moyen de 90.

#### 2.4. Du point de vue de la granulométrie

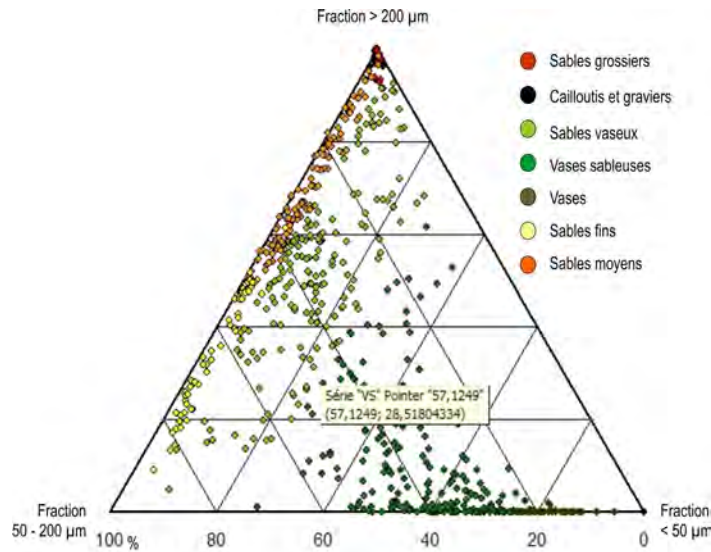
Les données granulométriques laissent apparaître une diversité significative de la classification. Seuls les sables caillouteux et sables graveleux (SC et SGr du tableau 2) ne sont pas représentés. Si seulement 11 échantillons sont des sables grossiers, respectivement 157 et 186 sont des sables vaseux et vases sableuses. Seuls 41 échantillons, soit 7,2 % des échantillons, sont des vases (Tableau 3).

**Tableau 3.** Proportion en % de chaque classe par rapport au nombre total d'échantillons.

C + GR	Sg	Sm	Sf	SV	VS	V	Fonds durs
3,7	1,9	15,9	10,3	27,5	32,6	7,2	0,9

Le graphe de la figure 8 donne une idée de la répartition respective des fractions sédimentaires :  $> 200 \mu\text{m}$ ,  $[50-200 \mu\text{m}]$ ,  $<50 \mu\text{m}$ , qui sont les classes principales rencontrées dans l'ensemble des échantillons. Les points ont été regroupés selon leur classification pour améliorer la lisibilité du graphique.

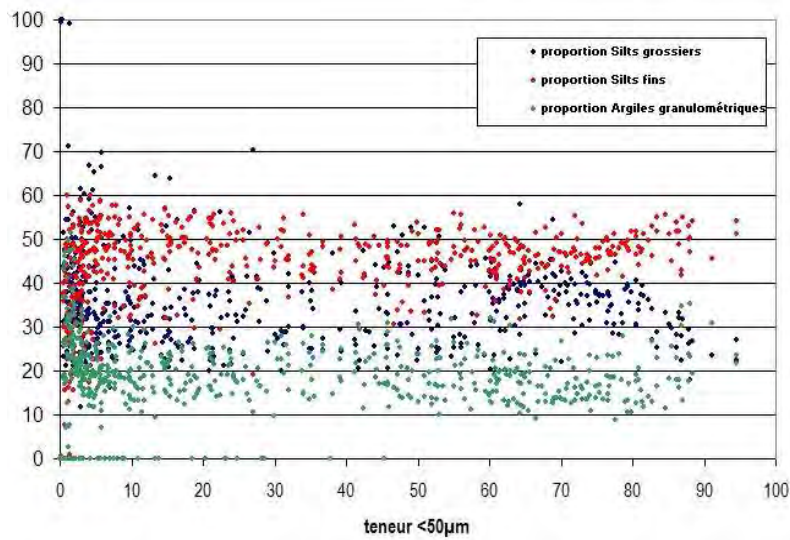
Il apparaît que, hormis pour les fractions très grossières ( $> 500 \mu\text{m}$ ), il n'y a pas vraiment de fraction pure (un seul échantillon de vase a pu contenir 95 % de sédiments fins). La dispersion des points est très importante, notamment pour les sables vaseux et les vases sableuses, qui peuvent comprendre une part égale de chacune des trois fractions représentées en figure 8. Ce net mélange des fractions granulométriques suggère que ces fractions sédimentaires ne sont pas en équilibre avec leur environnement dynamique (houles, courants, débit). Dans ce cas, il s'agirait d'un stock sédimentaire en cours de remobilisation.



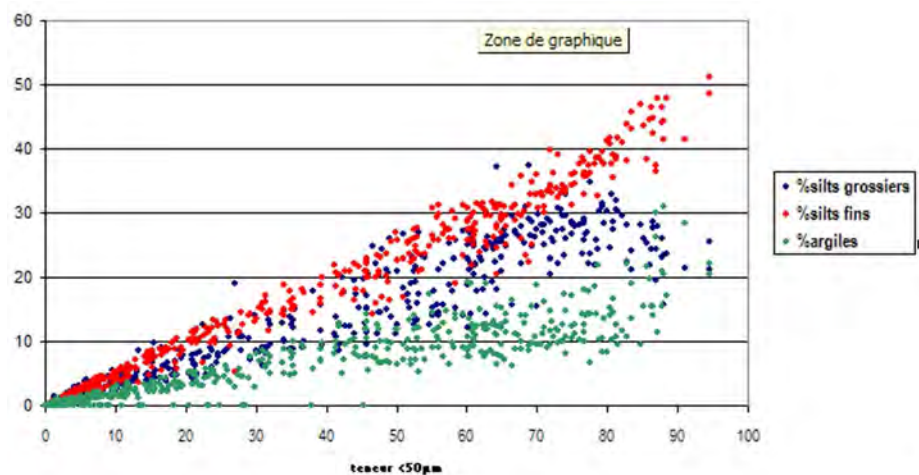
**Figure 8.** Répartition respective des fractions sédimentaires, classée selon 3 pôles,  $> 200 \mu\text{m}$ ,  $[50-200 \mu\text{m}]$ ,  $< 50 \mu\text{m}$ , sur l'ensemble des données.

Des échantillons présentant plus de 5 % de vases (donc classés sable vaseux dans le tableau 2) comportent une fraction graveleuse significative (plus de 40 % en masse. Ils ont été nommé "graviers envasés", faciès caractéristiques d'un recouvrement des graviers sous-jacents par des sédiments vaso-sableux ou sablo-vaseux, sur une épaisseur de l'ordre de 10 cm. Ces graviers apparaissent en effet la plupart du temps au fond de la benne Shipeck.

Le granulomètre Laser permet une détermination des fraction les plus fines, en deçà de  $50 \mu\text{m}$ . La figure 9 présente ainsi la proportion des silts grossiers ( $[50-20\mu\text{m}]$ ), des silts fins ( $[20-4 \mu\text{m}]$ ) et des argiles granulométriques (tailles inférieure à  $4 \mu\text{m}$ ) par rapport à la fraction fine. Il apparaît une relative constance de la teneur en silts dans les fractions fines, avec environ 50 % de silts fins, 30 % de silts grossiers et 20 % d'argiles granulométriques. Ainsi la corrélation entre la teneur en fines et la teneur en silts grossiers, silts fins et argiles granulométrique (Figure 10) est très bonne, avec des coefficients de corrélation  $R^2$  de l'ordre de 0,9.



**Figure 9.** Proportion des silts grossiers ([50-20µm]), des silts fins ([20-4 µm]) et des argiles granulométriques ([4 µm]) dans la fraction inférieure à 50 µm.



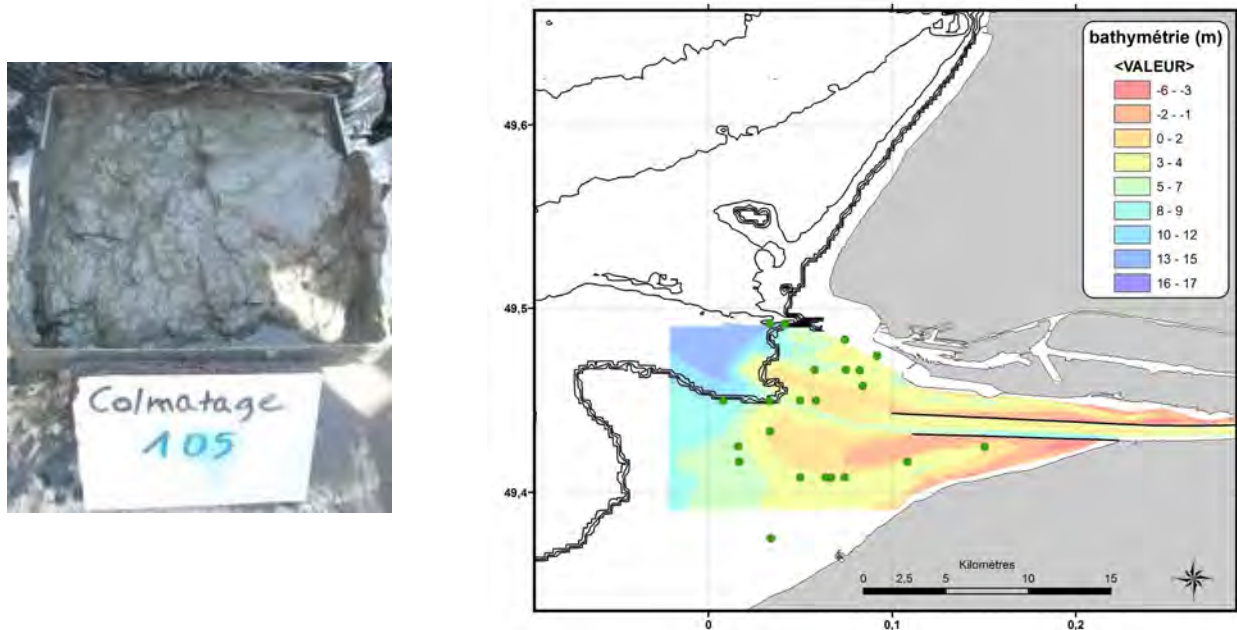
**Figure 10.** Proportion des silts grossiers ([50-20µm]), des silts fins ([20-4 µm]) et des argiles granulométriques ([4 µm]) dans la fraction totale, par rapport à la fraction inférieure à 50 µm.

## Faciès rencontrés

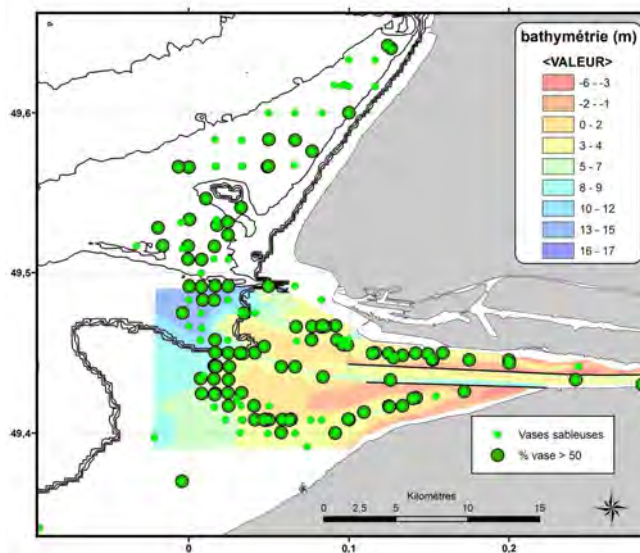
### Les vases

Les faciès de vases "franches" (Figure 11), c'est à dire des vases molles, voire fluides, contenant plus de 75 % de sédiments fins sont très peu présentes sur la zone d'étude, ce qui est une donnée nouvelle par rapport à la cartographie 1993-1996. Elles sont cantonnées en pieds

de banc (pourtour du banc des Ratelets) et dans les chenaux d'accès, du Havre et de Port 2000, sur des épaisseurs significatives (20 cm pour le chenal d'accès à Port 2000).



**Figure 11.** Répartition des vases franches sur la zone d'étude et photographie d'un échantillon vaseux (benne Shipeck). Repère en Degré décimal WGS84.



**Figure 12.** Répartition des faciès vaso-sableux et répartition des faciès vaso-sableux avec plus de 50 % de sédiments fins. Repère en Degré décimal WGS84.

Les vases sont ainsi essentiellement représentées par la classe des vases sableuses (25 à 75 % de sédiments fin), avec une grande proportion d'échantillon comprenant plus de 50 % de sédiments fins (figure 12). Ces faciès sont présents sur toute la zone d'étude.

#### *Les grumeaux de vase molle*



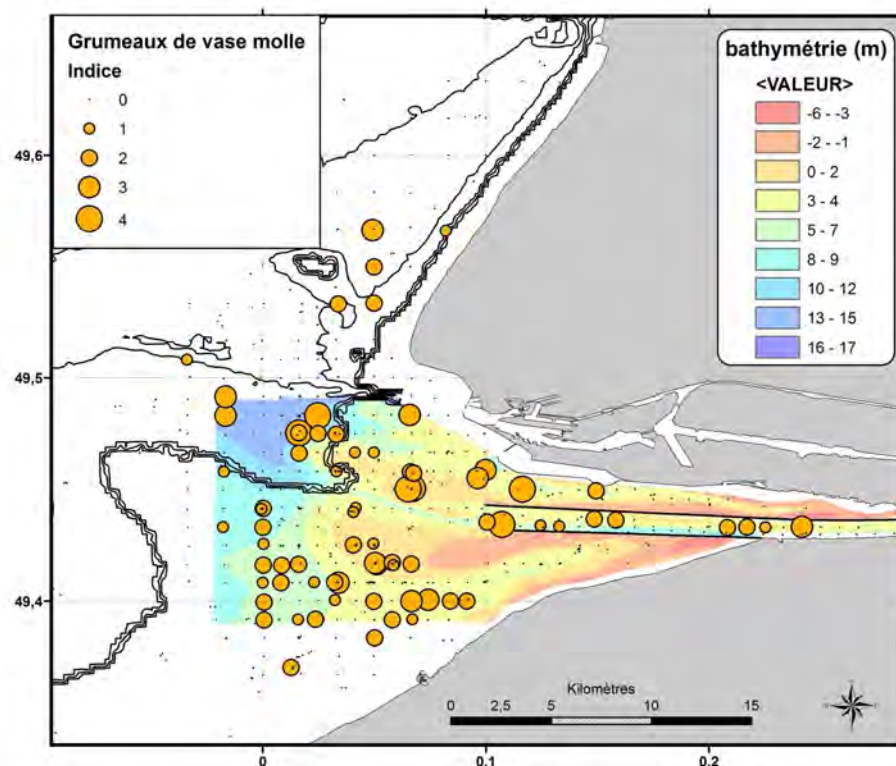
**Figure 13.** Classification de la présence de grumeaux de vase molle. 0 - pas de grumeaux, 1 - un seul grumeau, 2 - plusieurs, 3 - la surface sous-jacente est encore visible et 4 - la surface sous sous-jacente est masquée.

Lors de la description des faciès sédimentaires, des fractions fines sont observées sous la forme de petits amas de vase fluide à molle, caractérisés par le fait qu'ils n'ont pas de cohésion suffisante pour demeurer intacte lorsque l'on s'en saisit (c'est ce qui les distingue des galets mous). Ces petits amas sont nommés "grumeaux" de vase molle et sont des reliquats de dépôts vaseux récents, des vases fluides issues soit de la décantation de MES, soit plus probablement de crème de vase associée au bouchon vaseux, crème de vase expulsée du chenal principal de navigation lors d'évènements de forts débits fluviaux. De fait, ces grumeaux sont symptomatiques des mécanismes d'envasement de l'estuaire, en tant qu'étape de la redistribution des structures turbides, bouchon vaseux et crème de vase associée, du chenal de Seine. La mission d'avril 2004 avait reporté de nombreuses fois la présence de grumeaux ; le nombre d'échantillon de cette campagne 2009 permet d'en proposer une cartographie cohérente. Une classification (Figure 13) descriptive simple est établie à partir du



nombre de grumeaux présents, classification évoluant de 0 (pas de grumeaux) à 4 (recouvrement total de la surface par de la crème de vase).

La figure 14 est le résultat de cette classification. Il apparaît que ces grumeaux apparaissent dans l'ensemble de l'estuaire et jusqu'au large du cap d'Anfifer. Ils sont nombreux (indice 3 et 4) dans le chenal Nord et dans le chenal de Seine, ainsi que dans le prolongement direct de ce dernier. Ils sont logiquement présents dans les bas fonds et un nombre significatif d'échantillons montre des grumeaux au sud ouest de l'estuaire (indice 2). Il est à noter également la variabilité saisonnière du nombre de ces grumeaux, qui n'apparaissent pas systématiquement au cours des campagnes sur les sites ré-échantillonnés.



**Figure 14.** Répartition spatiale des grumeaux de vase molle dans l'estuaire de la Seine.

Classification en figure 12. Repère en Degré décimal WGS84.

### *Les galets mous*

Les galets mous forment une composante sédimentaire à part, dans le sens où ils sont fortement représentés dans l'ensemble de l'estuaire, et spécialement dans le chenal Nord. Les données antérieures décrivent des galets mous dans l'estuaire, en surface des dépôts sédimentaires, mais en quantité moindre. Leur présence était généralement consécutive à des périodes de fortes houles. Du point de vue granulométrique, ces sédiments sont normalement

classés en sable vaseux ou vase sableuse. Ils peuvent contenir jusqu'à 30 % en masse (analyse au tamis) de galets mous, emballés dans une matrice sablo-sableuse ou vaso-sableuse, sur toute la colonne sédimentaire explorée (c'est à dire sur l'intégralité de la benne Shipeck, généralement pleine). Ces derniers sont de taille et de composition variable : ils peuvent être formés de vases noires très compactes à peine arrondis ou de vases compactes grises (Figure 15). Ces échantillons à galets mous hétérogènes et hétérométriques font l'objet d'une classification faciologique, les sables à galets mous. Ils sont caractéristiques de démantèlement de fond vaseux compacts, subtidaux ou intertidaux. Lorsque les galets mous sont moins nombreux, ils sont globalement cantonnés en surface ; dans ce cas, c'est la fraction sédimentaire sous-jacente qui permet de classer l'échantillon.

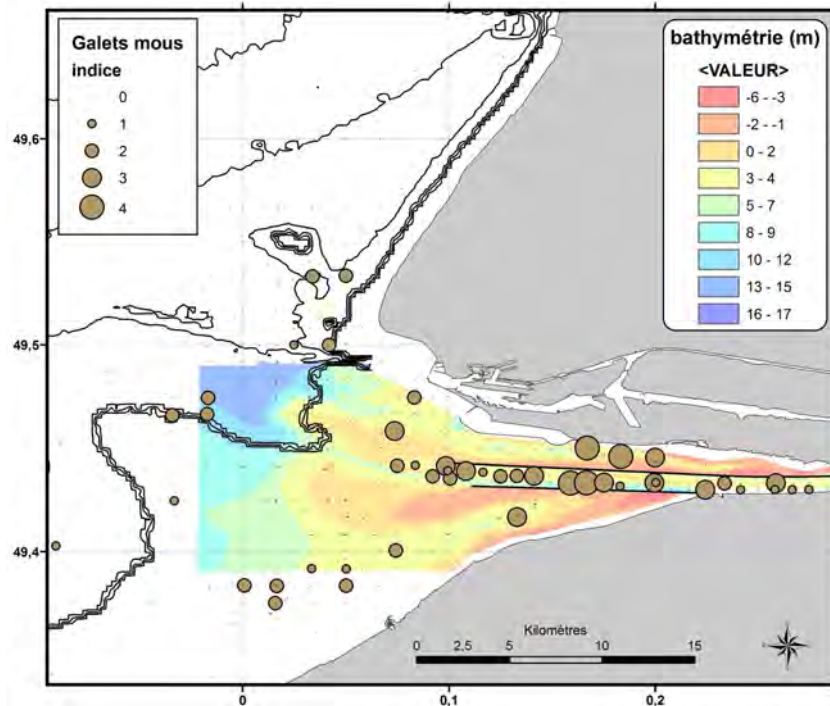
La mission d'avril 2004 avait reporté de nombreuse fois la présence des galets mous ; le nombre d'échantillon de cette campagne 2009 permet également de proposer une cartographie cohérente. Une classification (Figure 15) simple, similaire à celle des grumeaux de vase, est établie à partir du nombre de galets présents, classification évoluant de 0 (pas de galets) à 4 (recouvrement total de la surface par des galets mous, caractérisant le faciès "sable à galets mous").



**Figure 15.** Classification de la présence de galets mous. 0 - pas de galets, 1 - un seul galet, 2 - plusieurs, 3 - la surface sous-jacente est encore visible et 4 - la surface sous-jacente est masquée. A partir de l'indice 4, le faciès descriptif est "sable à galets mous".



La figure 16 est le résultat de cette classification. Il apparaît que les galets mous sont plutôt inféodés au chenal principal de navigation et au chenal Nord, où ils sont nombreux (indice 3 et 4). Ils apparaissent également au large d'Antifer, à proximité du parfond et au sud, le long des côtes du Calvados (indice 2).



**Figure 16.** Répartition spatiale des galets mous dans l'estuaire de la Seine. Classification en figure 14. Repère en Degré décimal WGS84.

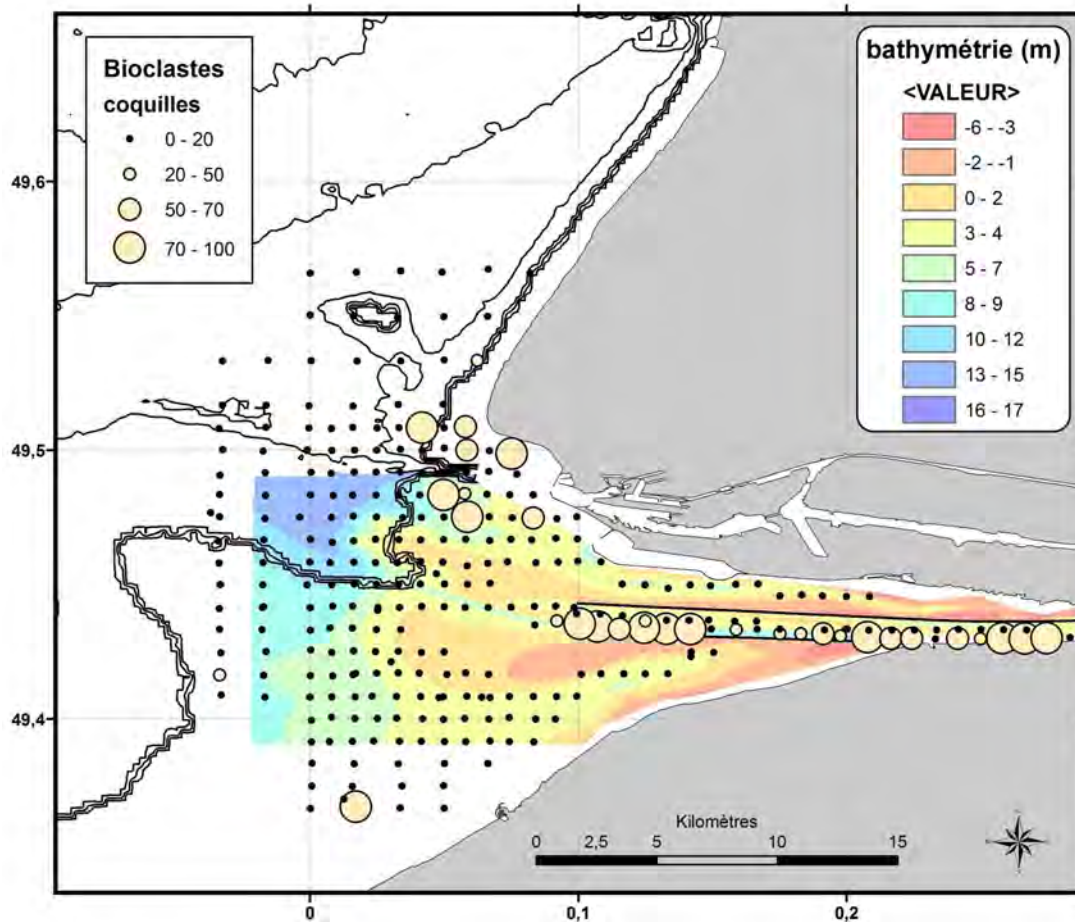
### *Bioclastes*

La mission d'avril 2009 a révélé des échantillons à forte proportion de bioclastes, coquilles entières et brisées, ces dernières étant présentes jusque dans les tamis de 200  $\mu\text{m}$  (Figure 17). Ces bioclastes sont en épaisseur suffisamment significative pour remplir une benne Shipeck, et représente jusque 99 % de l'échantillon en masse.



**Figure 17.** Photo d'échantillons à bioclastes et détail dans un tamis.

Ces bioclastes sont accumulés lors d'évènement de houle, que ce soit en subtidal qu'en intertidal. La figure 18 propose une cartographie de la proportion en masse de bioclastes dans les échantillons. Il apparaît nettement que, à l'instar des galets mous, les bioclastes sont inféodés au chenal principal de navigation. Ils sont également présents aux environs du chenal du Havre, et de manière erratique (un seul échantillon mais avec une forte proportion de bioclastes) au sud de l'estuaire.

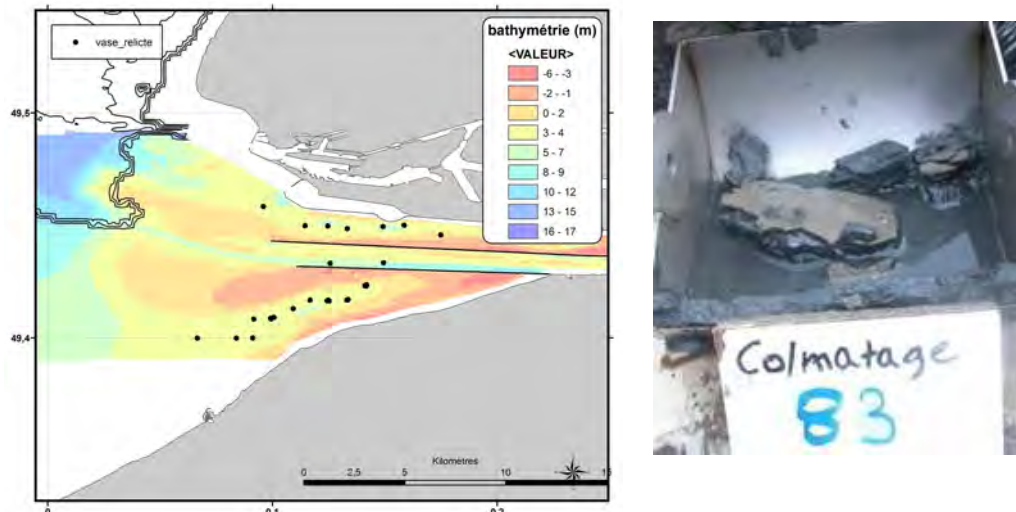


**Figure 18.** Répartition de la teneur en bioclastes. Valeur en % masse de l'échantillon total.

Repère en Degré décimal WGS84.

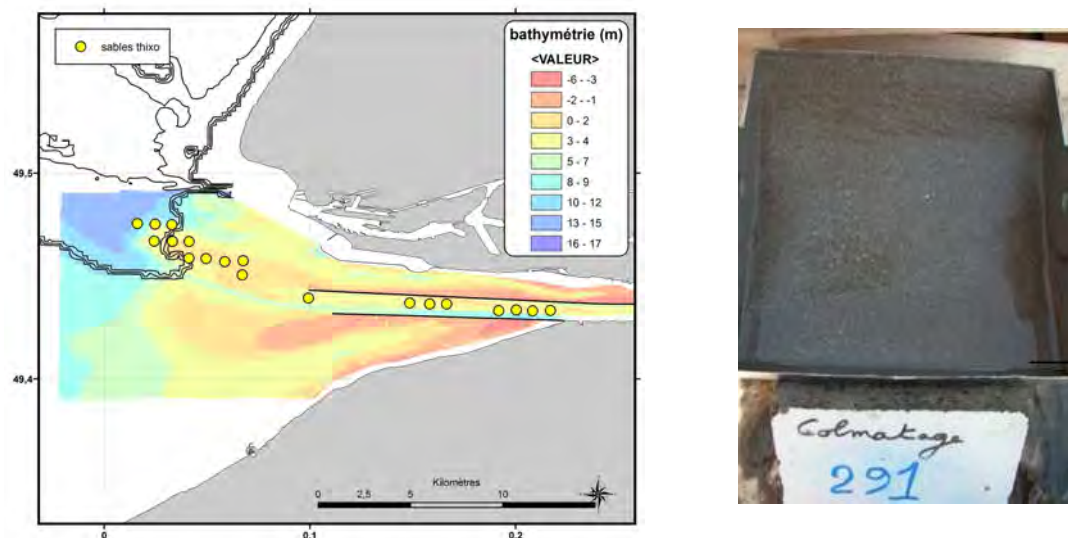
### *Autres faciès*

Il apparaît également d'autres faciès spécifiques, et ceci en lors de chaque mission. Parmi ceux-ci, les vases compactes anciennes dite "relictés" décrites en paragraphe 2. Elles sont observées depuis 1993 en chenal Sud (Figure 19), et sont également présentes en chenal Nord. Il s'agit de fonds anciens de vases homogènes ou finement litées, remis a nu lors de phases érosive pour le chenal Nord, recouverts épisodiquement (sable et vases) pour le chenal Sud.



**Figure 19.** Répartition des vases compactes anciennes et photo du faciès.

Des sables thixotropiques apparaissent quant à eux dans le chenal et au débouché du chenal de navigation (Figure 20). Ce sont des matériaux sableux (de l'ordre de  $200\ \mu\text{m}$ ) azoïques et très bien triés, associés au banc d'Amfard et sa prolongation, le dépôt de dragage du Kannick.

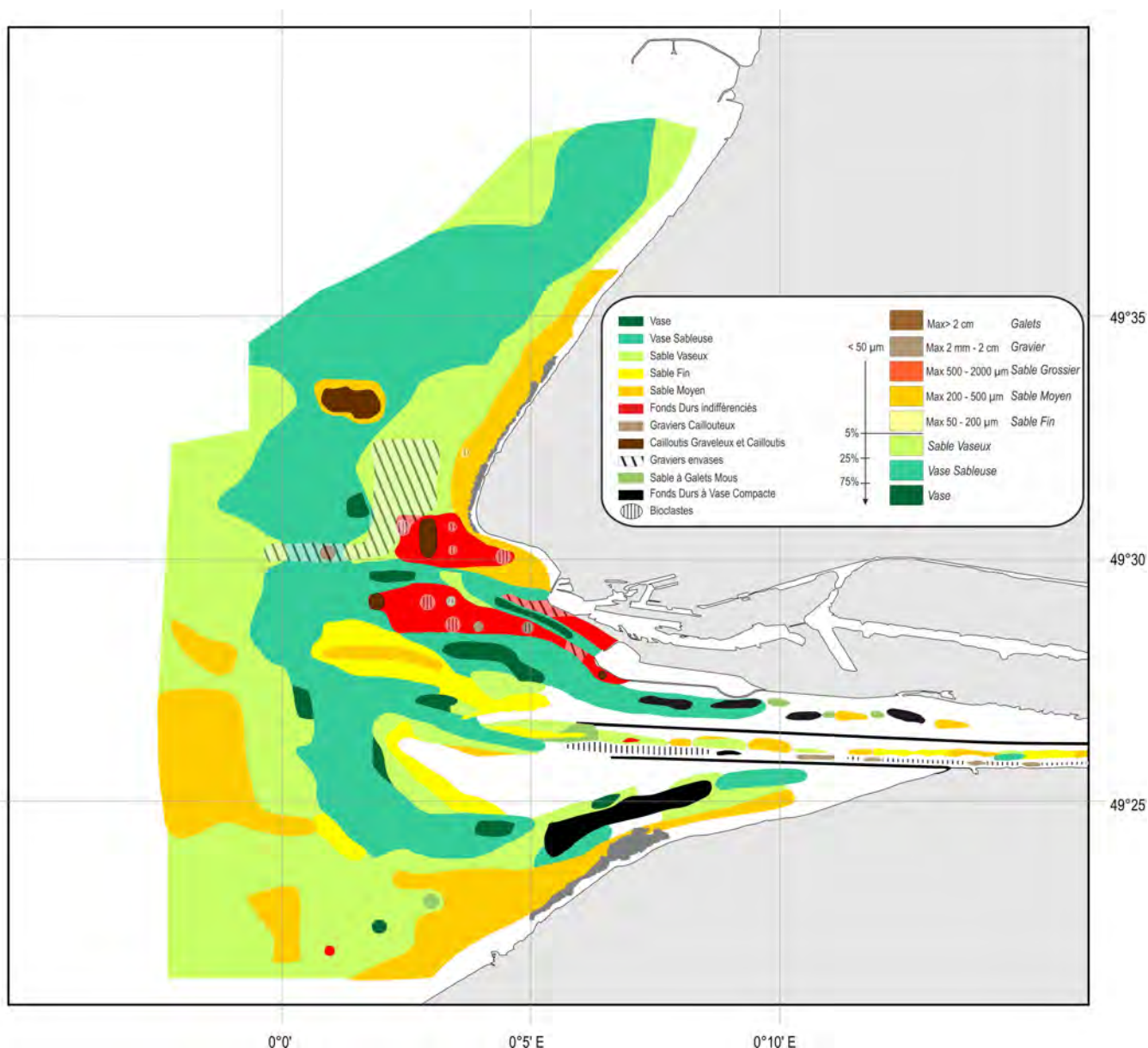


**Figure 20.** Répartition des sables thixotropiques et photo du faciès.



## 2.5. Cartographies des sédiments superficiels 2009-2010

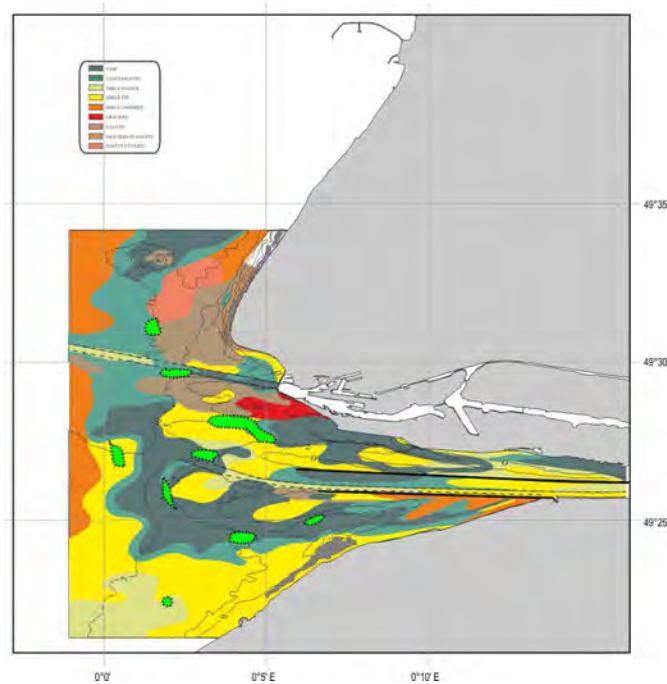
La carte de répartition des sédiments superficiels de l'estuaire de la Seine est une synthèse basée sur les données de la mission d'avril 2009, qui a couvert tous l'ensemble de l'estuaire, complétées par les données acquises lors de missions benthos, ce qui comprend les sites suivis, et par les données de la CSLN, pour la partie NE. Cette carte (Figure 21) est théoriquement une synthèse 2008 (septembre) - 2011 (mars), mais l'essentiel des données a été acquise en 2009 et 2010.



**Figure 21.** Répartition des faciès sédimentaire dans l'embouchure de la Seine en 2009 (échantillonnage 2009-2010).

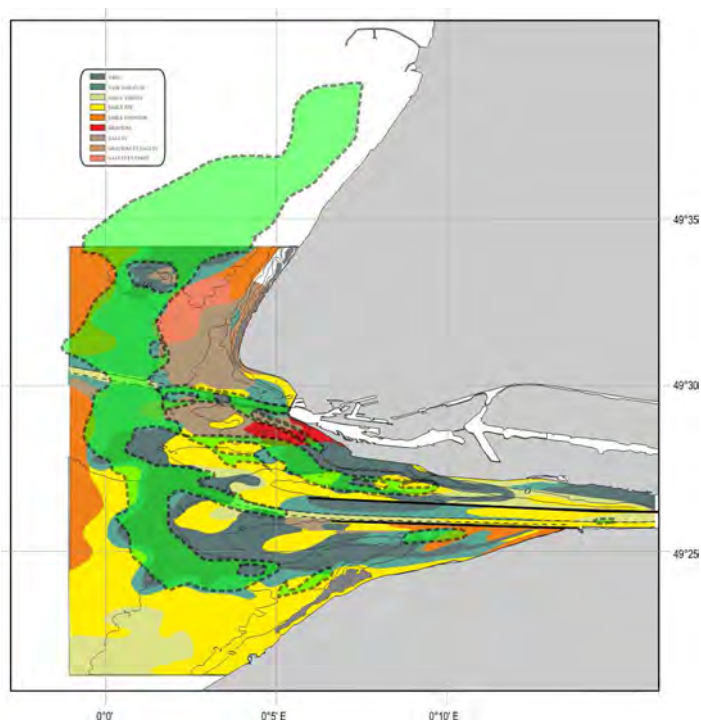
La carte est réalisée à partir d'environ 400 points si on ne considère que les échantillons ayant apporté une information nouvelle. De fait, la précision des courbes enveloppes est moindre que celle de 1993-1996 (1100 points). Elle a été réalisée sur la base d'étude faciologique et granulométrique, c'est à dire avec une description comprenant une photographie et une analyse granulométrique. Elle est réalisée "manuellement", en se basant sur la cohérence des données de terrain, sur la connaissance de la sédimentologie de l'estuaire et sur la bathymétrie. Lorsque les données ne sont assez cohérentes, seuls quelques patches ont été dessinés (cas de la partie interne du chenal nord et du chenal de navigation). Dans le cas où les variations saisonnières sont significatives, le faciès le plus représentatif est choisi ou moyenné eu égard aux données alentours.

Les vases "franches" (+ de 75 % de sédiments fins, faciès de vase molle) sont très peu présentes dans l'estuaire comparativement à la situation antérieure (Figure 22). Elles sont inféodées au pourtour du banc du Ratelets (en pied de banc) et dans les dépressions, notamment le chenal de navigation de Port 2000. Elles ont disparu du chenal Nord.



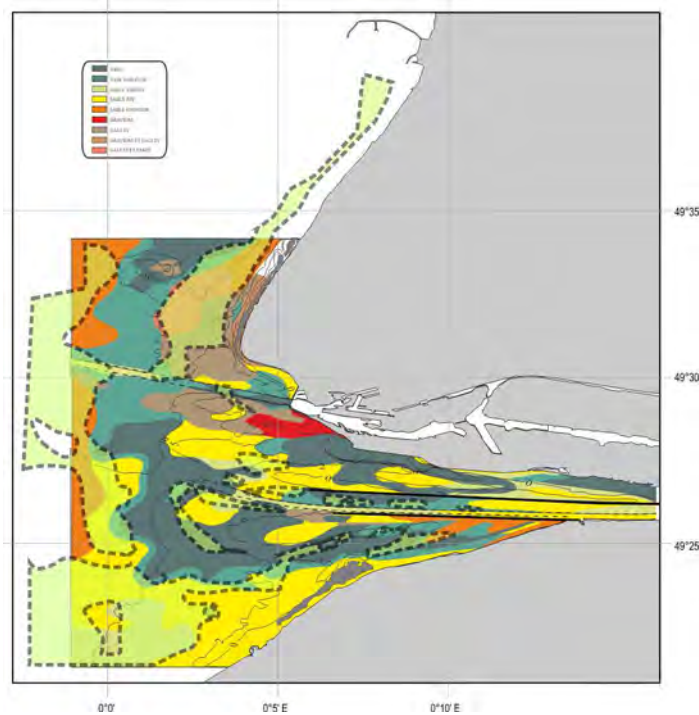
**Figure 22.** Répartition des vases en 2009 (vert vif) comparativement à 1993-96.

Les vases sableuses sont quant à elle omniprésentes dans l'estuaire. Si elles occupent encore les espaces où elles étaient décrites en 1996 (pourtour du chenal du Havre), elles semblent avoir disparu de la partie interne du chenal Nord et du chenal Sud. Elles occupent en grande partie l'espace des vases franches de 1993 (Figure 23), y compris pour la partie NE (Antifer) de l'estuaire où elles viennent en remplacement de ces faciès vaseux et en recouvrement de faciès identifiés en sable moyens envasés en 1993.



**Figure 23.** Répartition des sables vaseux en 2009 (vert vif) comparativement à 1993-96

Les sables vaseux sont extrêmement bien représentés sur cette cartographie, en contraste avec la situation de 1993 (Figure 24). Ils apparaissent en partie externe de l'estuaire, (1) en partie W où ils viennent recouvrir des sables fins et moyens, (2) en partie SW où ils étaient déjà cartés, mais avec une surface plus significative, et (3) en partie NE le long des côtes du pays de Caux, en recouvrement de faciès sableux (moyens) et graveleux. Plus que d'un recouvrement "cartographique", il faut parler d'un envasement des sables fins et moyens de la partie externe de l'estuaire. A noter que lors des études antérieures, l'étendue des faciès vaseux ne dépassait pas le 0° de Greenwich. Sur la carte 2009, elles atteignent les 2° de longitude W.



**Figure 24.** Répartition des sables vaseux en 2009 (vert vif) comparativement à 1993-96.

Les sables fins sont quant à eux beaucoup moins représentés que sur les cartes antérieures. En partie estuarienne, ils forment au débouché du chenal de navigation un banc particulièrement bien marqué, le banc d'Amfard/Kannick, caractérisé par la présence de sables thixotropiques azoïques.

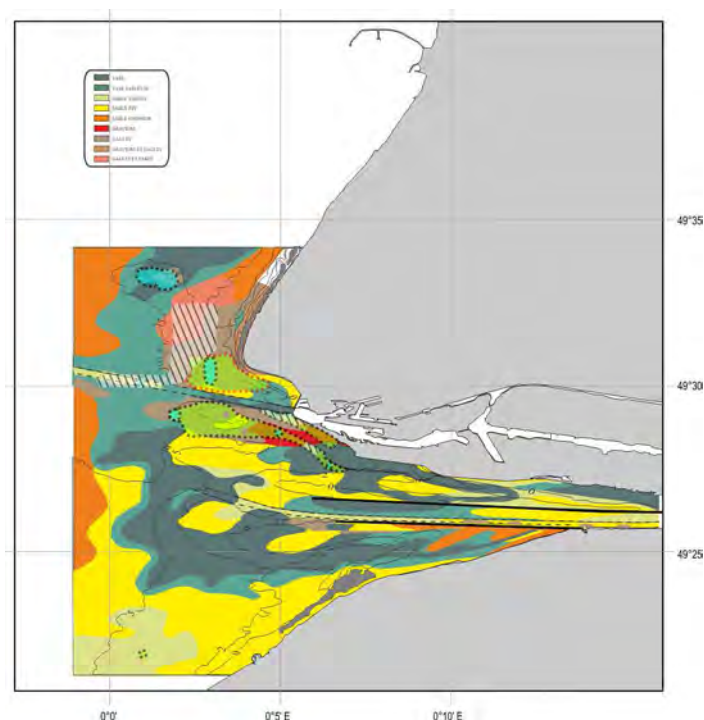
Du fait de la moindre densité de points, les galets et graviers sont plus difficiles à identifier. Au nord du chenal du Havre, parmi les graviers identifiés en 1993-96 (Figure 25), seuls deux points caractérisent les mêmes faciès. Le reste de carte de 2009 les identifie en fonds durs indifférenciés, qui sont de fait très probablement des galets. Les graviers au Nord de cette même zone ont été recouverts par des sables vaseux. C'est dans cette zone que l'on caractérise les graviers envasés.

Les mêmes réflexions peuvent être faites pour la partie sud du chenal du Havre, où seuls quelques points de faciès graveleux et galets permettrait d'identifier les fonds durs indifférenciés en fonds de galets, par ailleurs bien représentée en 1993-96. Les galets de 1993-96 identifiés au contact de la digue du GPMH sont trouvés en 2009, mais coupés par le chenal de Port 2000 et donc remplacé par des vases. Il est à noter la présence de fonds durs et graviers au contact de la nouvelle digue de Port 2000. Ces graviers sont par ailleurs envasés pour un point.

Un échantillon classé "fonds durs" a été trouvé dans la partie sud de l'estuaire. En l'absence de données complémentaires (bathymétrie fine) il est délicat de commenter la présence de ce point dur dans cette zone plutôt sablo-vaseuse.

Les graviers envasés de la carte 2009-10 correspondent ainsi à des faciès identifiés "galets" et "galets envasés" recouverts par une couverture sédimentaire sablo-vaseuse qui les classerait, du point de vue de la granulométrie, en sablo-vaseux (Figure 25). Ils sont également retrouvés de part et d'autre du chenal de Port 2000, ce qui caractériserait un envasement des fonds grossiers, envasement à mettre en relation avec les faciès vaso-sableux juxtaposant ces zones.

Les bioclastes sont décrits à deux endroits distincts, dans le chenal de navigation et sur les faciès à fonds durs à l'ouest du port du Havre. En ce qui concerne ces derniers, bien qu'il soient définis comme des faciès à part (benne pleine de débris coquilliers et de coquilles entières), ils viennent en recouvrement ponctuels (et dans doute très mobiles) des fonds à graviers et galets. Leur présence relève ainsi plus d'un dépôt transitoire épisodique. Dans le chenal de navigation, les bioclastes sont identifiés en dépôts cohérents, le plus souvent associés à des sables grossiers. Leur présence dans des fonds plutôt sableux est à mettre au compte des travaux de dragage réalisés dans cette partie de l'estuaire.



**Figure 25.** Répartition des graviers et galets (bleu vif), des fonds durs (vert vif) et des graviers envasés (hachurés) en 2009 comparativement à 1993-96.



Par ailleurs, l'ensemble du chenal de navigation apparaît comme fortement anthropisé, caractérisé en cela par des fonds graveleux et des fonds à vase relicte. La diversité des faciès rencontrés dans la partie nord du chenal de navigation, avec une cohérence spatiale délicate dans le cadre d'une évolution saisonnière rapide (Glippa, 2010), implique une cartographie par patches et une interprétation délicate.

Les sables à galets mous (figure 14, indice 4) sont également décrits au débouché immédiat du chenal et dans le chenal principal ; leur présence est cohérente avec l'idée que les faciès du chenal de navigation soient des faciès anthropisés de démantèlement.

Ces même galets mous sont trouvés dans le chenal nord selon les mêmes quantités (Figure 15 indice 4), ce qui souligne également que les sédiments du chenal nord soient en remaniement, sous l'effet de l'érosion latérale des vasières, des apports sableux dans cette zone, l'ensemble étant lié à la modification profonde du chenal, due au creusement du chenal environnemental en amont et à port 2000 en aval. Les faciès sont également caractérisés par la présence de vases compactes anciennes à l'affleurement, selon des surfaces sur-creusées (Figure 26).

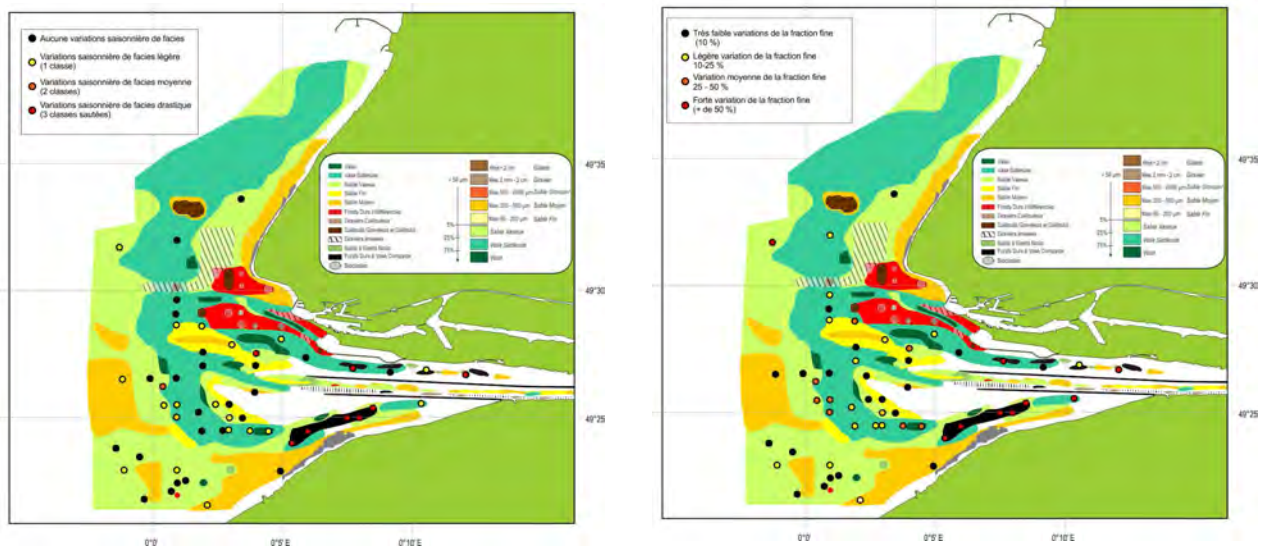
Dans le chenal Sud, ces faciès de vase noire compacte à l'affleurement sont connus depuis longtemps. Ils sont regroupés, au contraire du chenal Nord, dans une vaste zone cohérente. Ils sont susceptibles d'être recouverts épisodiquement par des sables plus ou moins vaseux. Une autre spécificité du chenal Nord est la présence de patch de vases molles à *Owenia*, à l'aval du chenal Sud. De fait, la répliquabilité des échantillons peut être délicate. Ces *Owenia* sont caractéristiques d'une relation étroite entre sédiment et population benthique (Alizier, 2011).



des données), (3) variation moyenne de la teneur en fines (les teneurs en fines évoluent de 25 à 50 points sur l'ensemble des données), (4) forte variation de la teneur en fines (les teneur en fines évoluent de plus de 50 points sur l'ensemble des données). Comme ces variations de teneur en fines peuvent, ou pas, influencer la classification, le même exercice est réalisé sur les faciès classifiés, selon les modalités suivantes : (1) aucune variation de faciès, (2) légère variation de faciès (changement de 1 classe, par exemple de Sable fin à Sable vaseux) (3) variation moyenne de faciès (changement de deux classes, par exemple de Sable fin à Vase sableuse, (4) forte variation de faciès (changement de 3 classe, par exemple de Sable fin à Vase). Un passage de sable moyen à sable fin est classé (1).

Les résultats sont présentés sur la figure 27. Il apparaît en premier lieu que les variations sont modérées, tant du point de vue de la teneur en fines que du faciès. Ceci impliquerait un faible impact des crues très limitées, en intensité et en temps, observées durant la période d'étude (Figure 7). Les zones à fortes variations sont les zones de vase relicte (fond dur à vase) qui sont recouverts épisodiquement de sables et de vases franches, en chenal Nord et en chenal Sud. Un point à forte variation apparaît également en bordure sud du chenal nord. Il s'agit de sables fins recouverts épisodiquement de vases franches, au gré des apports fluviaux.

Les sables du banc des Ratelets montrent des variations de la teneur en fines globalement très faibles, sans changement de faciès. Les sables du banc d'Amfard connaissent des faibles variations de faciès et teneur en fines, surtout sur le pourtour Nord.



**Figure 27.** Variations saisonnières en termes de faciès (gauche) et de la teneur en sédiments fins (droite) lors des missions colmatage.

La variabilité sédimentaire est logiquement liée aux vases sableuses, faciès dominant sur la carte. Si les quelques points disponibles laissent présager d'une stabilité des faciès au cœur du

banc, aidée en cela par de faibles variations de teneur en fines, c'est surtout les limites de ce bancs qui montrent des fluctuations, spécialement dans la partie SW de la baie, où l'on peut passer de sable à vase sableuse, ou, plus généralement, de sable vaseux à vase sableuse. Ceci suggère une mobilité des vases induisant une géométrie variable de la limite des faciès vaso-sableux, spécialement sur sa bordure W. Dans la partie SW de la zone d'étude, les variations de teneur en fines sont faibles et font basculer ponctuellement les faciès de sables à sable vaseux.

Compte tenu de condition de débits faiblement contrastés, il est difficile de tirer une conclusion nette sur l'évolution de la teneur en fine selon une séquence temporelle.

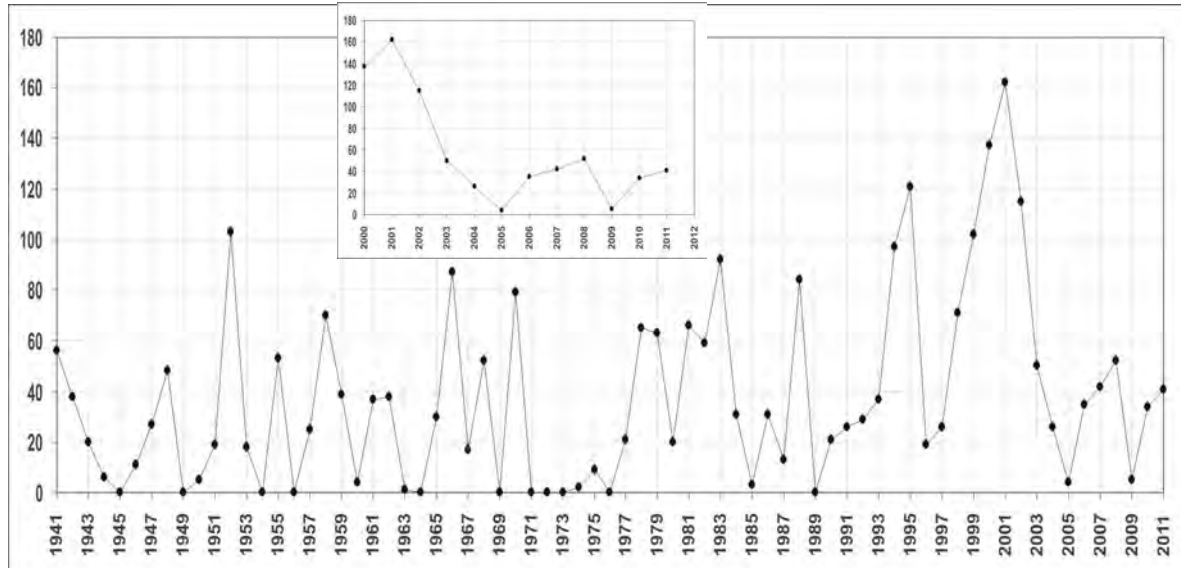
## 2.7. Apports nouveaux

La carte de 2009-2010 montre moins de faciès de vases franches (+ 75 % de sédiments de taille inférieure à 50  $\mu\text{m}$ , vase molle) tels qu'observés en 1993-1996. Si l'on considère la carte dans sa globalité, les grands traits de l'évolution depuis 1993-1996 peuvent être résumés comme suit : (1) disparition des vases, incluant un "nettoyage" du chenal Nord, (2) remplacement des faciès vaseux par des faciès vaso-sableux et (3) diminution des faciès sableux au profit des faciès sablo-vaseux. Il s'agit ainsi d'une redistribution des faciès de vases franches, autrefois observés aux débouchés immédiat du chenal de navigation selon des épaisseurs significatives, ceci dans l'ensemble de l'estuaire, sous la forme d'un envasement plus diffus, c'est à dire sous la forme d'une intégration progressive des vases dans les phases sableuses induisant des faciès sablo-vaseux et vaso-sableux.

Cet envasement connaît une nette extension au delà des limites anciennes connues (le 0° de Greenwich), vers le NW pour les vases sableuses et vers l'W pour les sables vaseux, au-delà du 2° W. Il est à noter que si le plan d'échantillonnage de 2009 allait judicieusement au-delà des limites anciennes connues, il ne permet pas de juger de la limite exacte de cette extension des sables vaseux vers l'ouest. Cette extension des faciès vaseux dans la Baie de Seine conduit à un recouvrement partiel des galets et graviers observés en 1993-1996.

Les processus sédimentaires contemporains de la carte 2009-10 se déroulent en période d'étiage prolongé. En effet, l'historique des débits liquides montre une absence de crues significatives depuis une dizaine d'année (Figure 28). Les périodes de crue (débits de plus de  $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , significatifs du point de vue des conséquences hydrosédimentaires) ne sont pas assez longues pour mobiliser les structures turbides (MES et crème de vase associée) du bouchon vaseux. Signalons que durant l'année 2011, le nombre de jours où le débit liquide

était inférieur à  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (fort étiage) est de 141, ce qui est proche des maxima (pour ce nombre) enregistrés depuis 1941. Cette dynamique du bouchon vaseux implique des apports moindres en estuaire et dans la baie de Seine Orientale.



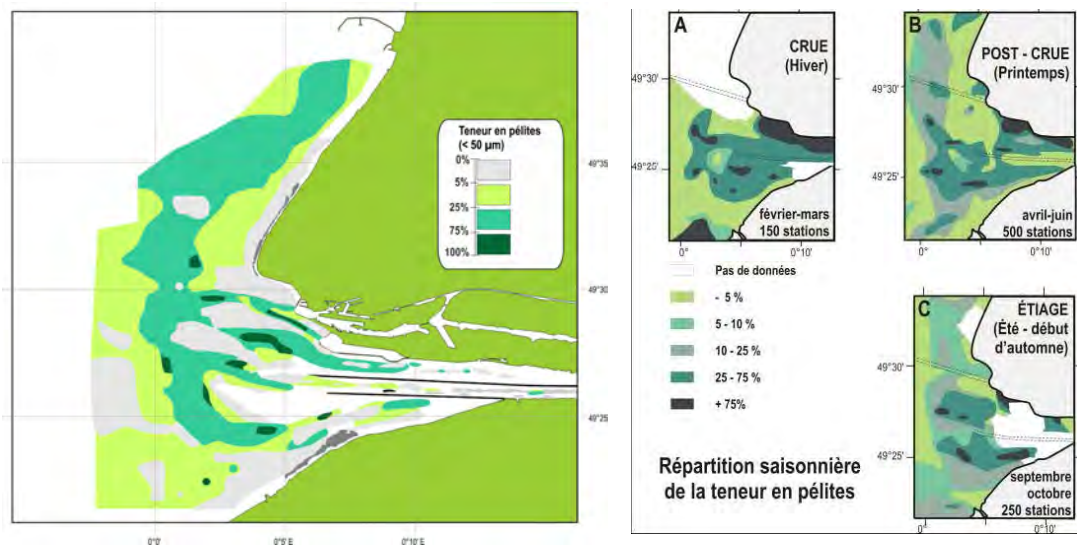
**Figure 28.** Nombre de jours où le débit fluvial est supérieur à  $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Zoom sur les années 2000.

Le cycle des sédiments décrits pour les années 1993-1996 (Lesourd, 2000) impliquait un apport massif de matériel particulaire issus de l'expulsion du bouchon vaseux, redistribué pour partie vers la baie de Seine, pour partie vers les parties internes de l'estuaire, spécialement le chenal Nord qui se comportait comme une zone de stockage temporaire de sédiments fins. En l'absence d'apports significatifs, tout se passe comme si les dépôts vaseux de 1993 -1996 avaient été déblayés dans l'ensemble de l'estuaire sans être remplacés par des nouveaux apports. Il faut cependant préciser que l'envasement en estuaire de Seine et en proche Baie de Seine reste significatif, sous la forme de dépôts vaso-sableux qui, pour l'essentiel, sont des dépôts significatifs, c'est à dire que les bennes Shipeck sont pleines. Ce fait implique des dépôts massifs, et non des pellicules superficielles de matériel fin sur un substrat sableux.

La carte de 2009-10 comporte ainsi des similitudes avec les cartes saisonnières de la sédimentation fine (Lesourd, 2000) qui mettait en avant une redistribution des faciès vaseux déposés en crue (Figure 29). D'une sédimentation plutôt événementielle en crue, caractérisée par des gradients très forts (on passe sur un espace restreint de vase à sable), la répartition des teneur en fines montre en étiage un gradient très étiré dans l'espace, associé à une extension nette dans l'estuaire, mais avec des teneurs généralement en deçà de 10 % de sédiment fins,

ponctuellement entre 10 et 25 % ; les sédiments fins en extension sur la carte de 2009-10 présentent des teneurs en fines supérieures à 25 %.

Les grumeaux de vase (Figure 14) pourraient ainsi être considérés comme une version "allégée" des processus d'envasement de l'estuaire de la Seine. Si ces derniers existaient lors des prélèvements 1993-96, leur présence et leur implication dans la dynamique des sédiments fins était occultée par la dynamique des dépôts massifs de vases franches.



**Figure 29.** Carte de répartition de la teneur en sédiments fins (< 50µm), carte de 2009-10, et carte de répartition des sédiments en fonction de trois saisons (Lesourd, 2000).

Les galets mous sont significativement présents dans l'estuaire, au point de caractériser un faciès. Ces galets mous ont en général pour origine un démantèlement des vases compactes subtidales mais surtout intertidales. Pour la carte de 2009-10, ils proviennent du chenal Nord, mais aussi du chenal de navigation. Le nombre de galets mous est à mettre au compte des conséquences des travaux en estuaire, conséquences directes (dragages) et indirectes (remodelage du chenal Nord et travaux Port 2000) ayant occasionné une modification morphologique du chenal Nord caractérisé notamment par une diminution de la surface de slikke de la vasière Nord.

Ces galets mous participent activement à un envasement plus spécifique. Lorsqu'ils sont en surface, ils sont mobilisés par les agents dynamiques ; abrasés, ils libèrent des MES par arrachement de floes, dans la masse d'eau. Sur nombre d'observations, ils sont intégrés à une matrice sableuse ou sablo-vaseuse, souvent mobile. Également abrasés, ils libèrent des particules fines au sein de la masse sédimentaire, créant ainsi un processus d'envasement "intrasédimentaire" (Figure 30). Certaines photos montrent des "fantômes" de galets mous,



c'est à dire des reliquats de galets mous caractérisés par le fait que l'on ne voit plus nettement la limite sable/galets mou, celle ci étant diffuse dans le cadre d'une intégration à la matrice sableuse.



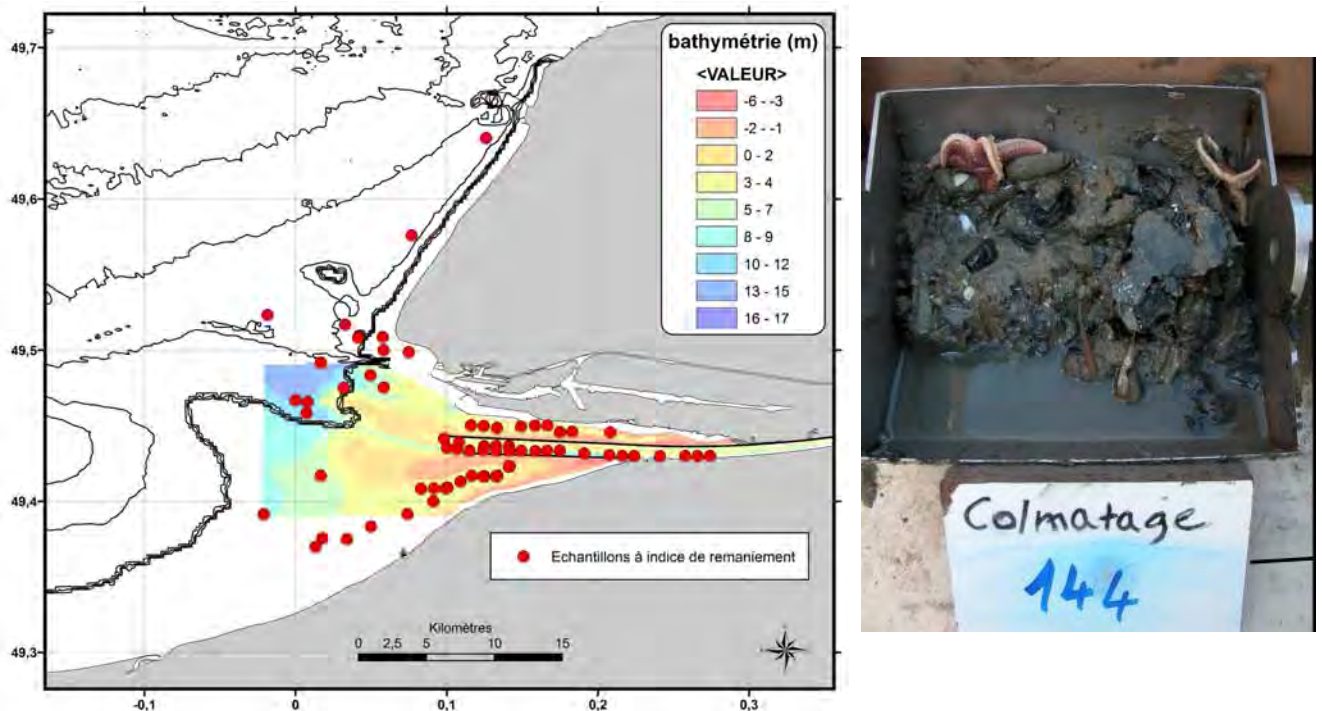
**Figure 30.** Photographie de deux bennes montrant des galets mous incorporés à la matrice sableuse, en partie pour la photo de gauche (la surface du galet n'est plus lisse) et totalement pour la photo de droite, où il s'agit de "fantôme" de galets mou.

Cette dynamique intra-sédimentaire explique en partie un enrichissement des faciès sableux en fines, qui se fait ainsi par intégration en surface (décantation de MES et intégration au sédiment, mélange d'un dépôt superficiel vaseux au couches sous-jacentes) mais aussi au sein même du sédiment par abrasion des galets mous intégrés au sédiment.

Les sédiments des campagnes COLMATAGE montrent de fortes caractéristiques de remaniement. Du point de vue de la granulométrie, le net mélange des fractions granulométriques suggère que ces fractions sédimentaires ne sont pas en équilibre avec leur environnement dynamique (houles, courants, débit). Du point de vue faciologique, les galets mous caractérisent nettement un démantèlement de faciès vaseux compacts et une redistribution intrasédimentaire de fines. Les vases relictés, expressément celles du chenal nord, attestent de la mise à nu de fonds sédimentaires anciens, tandis que les bioclastes sont le fruit d'un vannage sédimentaire induisant un tri selectif des particules, les coquilles, moins dense étant exportées plus significativement et déposées, de manière transitoire, dans certains espaces de l'estuaire. Les sables thixotropiques azoïques peuvent eux aussi caractériser un remaniement et un tri de faciès sableux, la couverture sédimentaire n'étant pas suffisamment stabilisée pour que l'eau interstitielle puisse s'évacuer. Certains échantillons sont quant à eux classifiés du point faciologique "sédiment remaniés". Difficiles à décrire, ils sont globalement

composés d'un mélange de sable et de vase, selon une structuration indéterminable, associant galets mous et gantômes de galets mous et débris coquilliers de toutes tailles.

La figure 31 présente l'ensemble des échantillons comportant ces indications de remaniement.



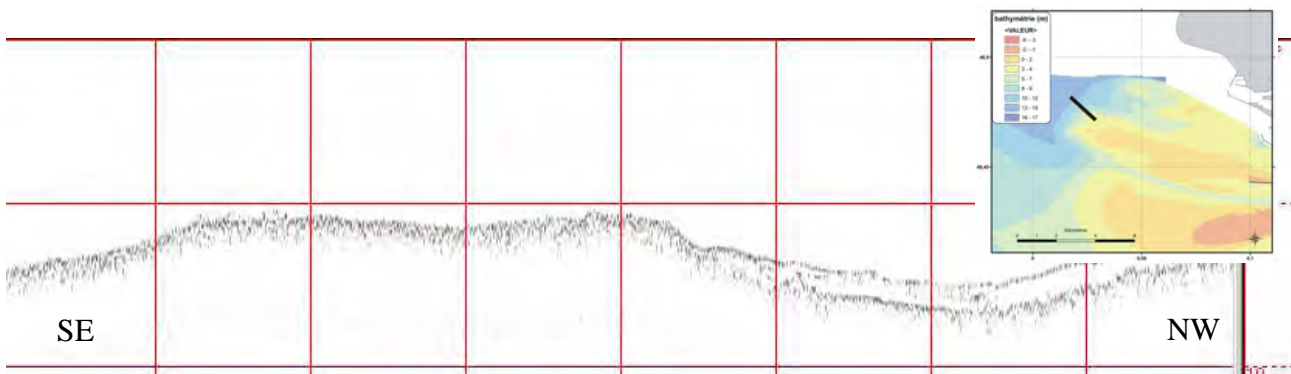
**Figure 31.** Positions des échantillons présentant des indices de remaniement : Sables à galets mous, vases relictés, bioclastes, sables thixotropiques et sédiment remaniées s.s., en photo à gauche.

Le chenal Nord est emblématique de cette notion de remaniement. Actuellement en plein réajustement morphologique, il est caractérisé par de fortes érosions (mise à nus de fond anciens et faciès à galets mous) tandis que les dernières tendances montre un ensablement de la zone, particulièrement au pied du pont de Normandie. Les vases de 1993-96 en ont été expulsés ; une partie a été déposée en aval du chenal, selon des faciès vaso-sableux. Le chenal Sud lui est plutôt caractérisé par un remaniement permanent et plus "naturel", marqué essentiellement par la remobilisation de la bordure vaso-sableuse du banc des Ratelets et leur dépôt épisodique sur des fonds anciens. Le chenal de navigation est quand à lui de facture nettement anthropique. Les autres échantillons "remaniés" sont principalement répartis en partie SW, le long des côtes du Calvados, à l'W du Cap d'Antifer et dans la rade de la Carosse. Ces indices de remaniement posent la question de la stabilité de cette couverture sédimentaire. Elle répond de nos jours à des réajustements morphologiques majeurs dans l'estuaire suite aux travaux de port 2000, dans un contexte d'étiage prolongé. De fait, l'estuaire mettra probablement encore quelques temps (années ?) pour trouver un équilibre



morphosédimentaire dans lequel la répartition de la couverture sédimentaire répondra à des contraintes naturelles (houles, marée et débit), par ailleurs elles même modifiées par les aménagements.

Les bancs d'Amfard, en fait prolongé par le dépôt du Kannick, et celui des Ratelets forment des ensembles morphologiques nettement différenciés, plutôt sableux pour Amfard et sablo-vaseux pour les Ratelets (partie ouest). Ce dernier était plus vaso-sableux, voire vaseux, en 93-96. Au pied de ces bancs sont disposés les faciès vaso-sableux. Leur morphologie respective implique un passage graduel des faciès vaso-sableux à sableux pour les Ratelets, selon une pente relativement faible par rapport à celle du banc d'Amfard /Kannick, où les pentes plus fortes impliquent un contact direct entre vase sableuse et sable. Un essai de mise en ouvre d'un sondeur sismique léger Edgetech a permis de rendre compte de cette morphologie. (Figure 32).



**Figure 32.** Un court profil sismique (sondeur ultra son léger Edgetech) montrant la morphologie du dépôt de vase sableuse.

Il est possible de voir la géométrie du faciès vaso-sableux, épais de 30 à 40 cm (visualisation par carotte) sur un fond sableux, au contact du banc de sable.

En conclusion, la répartition des faciès sédimentaire dans l'embouchure (échantillonnage 2009-2010) montre une évolution significative comparée à la situation 1993-1996. La tendance générale est une redistribution des sédiments fins dans l'ensemble de l'estuaire. Si les faciès vaseux disparaissent au profit des faciès vaso-sableux, les faciès sablo-vaseux connaissent une forte extension au détriment des faciès sableux. Les extensions se font vers le NW pour les faciès vaso-sableux et vers l'W pour les faciès sablo-vaseux. Le chenal nord connaît un désenvasement significatif, sous la forme d'une expulsion des vases anciennes (sables à galets mous) et récentes. Il est observé un recouvrement partiel des anciennes surfaces à galets et graviers. De nombreux faciès montrent des caractéristiques de

remaniement : présences de galets mous en quantité significative, sables azoïques, bioclastes, vases anciennes remise à nu. Ces indices de remaniement montre que la couverture sédimentaire répond à des réajustement morphologiques majeurs dans l'estuaire, suites aux grands travaux engagés depuis 2000, ceci dans un contexte d'étiage prolongé. De fait cette couverture n'est pas forcément stabilisée, du point de vue d'un équilibre morphosédimentaire qui n'est pas atteint. Cette cartographie 2009-2010 sera implémentée pour la partie chenal Nord intertidale en utilisant la couverture par photographie aérienne des surfaces non végétalisées.

### 3. Evolution des surfaces intertidales non végétalisées de la fosse Nord (2000-2011)

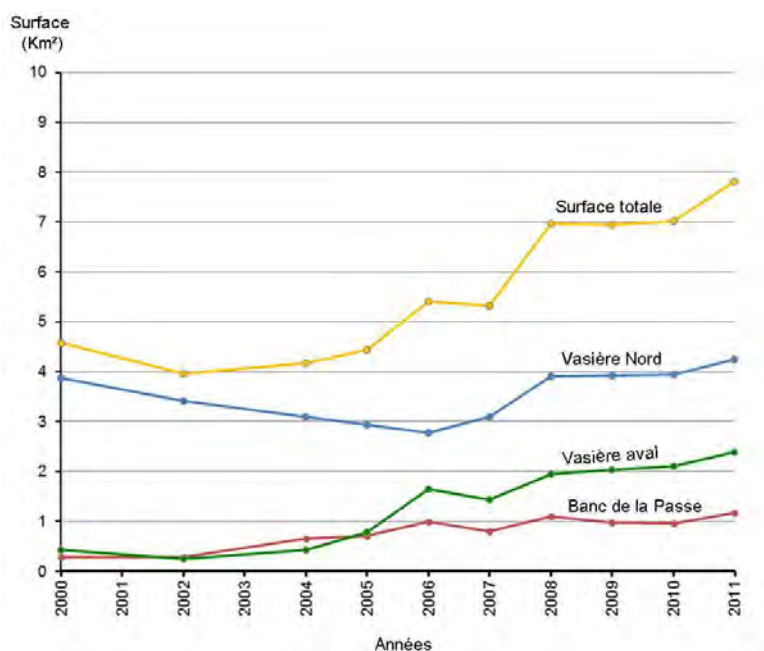
L'évolution des surfaces intertidales non végétalisées de la fosse Nord a été réalisée sur la période 2000 – 2011. On exclut par conséquent de cette analyse la partie du schorre envahie ponctuellement lors des épisodes de grande marée (Deloffre et al., 2006 ; Cuvilliez, 2008). Cette surface, située sur la rive droite de l'embouchure de l'estuaire de la Seine, représente 17,7 km<sup>2</sup> (Figure 33).



**Figure 33.** Surface faisant l'objet de l'étude dans le cadre du projet COLMATAGE

Les résultats obtenus par télédétection à haute résolution sur la période 2000 - 2011, montrent une croissance de 97,3 % des surfaces intertidales entre 2002 et 2011 (Figure 34). Toutefois, cette évolution montre des dates et des périodes clés. Ainsi, jusqu'en 2002, la surface intertidale totale décroît en l'absence de nouveaux aménagements réalisés par le port et suite à un engraissement du banc de la Passe responsable, à lui seul, de l'érosion de la vasière Nord (Cuvilliez, 2008, Cuvilliez et al., 2009). A partir de 2003, la construction de la digue en épi favorise directement l'érosion de la Vasière Nord et indirectement son érosion parce qu'elle favorise l'engraissement du banc de la Passe (Cuvilliez, 2008). Cet aménagement semble

également être le paramètre contrôlant les dépôts sédimentaires situés sur une surface située à son aval (la vasière aval, Figure 34) préalablement occupée par des bancs mobiles à dominante sableuse de faible extension (Figure 35).



**Figure 34.** Evolution des surfaces intertidales non végétalisées par unités et totale de la fosse Nord de 2000 à 2011.



**Figure 35.** Cette photographie, prise en 2002, montre la faible extension des bancs sableux adossés à la digue basse Nord avant la construction des soubassements de la digue en épi plus en amont (photo © Antoine Cuvilliez).

Si l'érosion de la vasière Nord se poursuit jusqu'en 2006 consécutivement à la construction de la digue en épi et à la croissance vers le Nord du banc de la Passe (Cuvilliez, 2008) ; ce dernier aménagement favorise également la formation d'une vasière à son aval adossée sur la digue basse Nord. Cette sédimentation, dans un premier temps instable, régresse en 2007 puis se consolide sur son flanc Nord avec notamment la formation de bancs sableux à mégarides qui enrayent son érosion lors du flot. Par la suite, la croissance de cette vasière aval s'opère alors le long de la digue basse Nord vers l'Ouest.

A partir de 2006, on enregistre une augmentation rapide de la surface de la vasière Nord consécutive à (i) un apport sableux important de flot dominant et (ii) l'engorgement du méandre amont connecté à l'Est de la zone d'étude qui ne permet plus une réelle circulation hydraulique dans le chenal de la fosse Nord vers l'aval. Ce colmatage, couplé à l'absence d'une grande crue de la Seine qui aurait pu jouer un effet de chasse (Lesourd et al., 2003) s'auto-entretient et donc s'accroît. C'est ce que montrent les données de télédétection à haute résolution avec une accélération de l'extension des zones intertidales non végétalisées dans la fosse Nord sur la période 2010-2011 estimée à + 11,4 % (Figure 34).

#### 4. Habitats benthiques

L'essentiel des travaux réalisés sur les habitats benthiques pendant le projet COLMATAGE figure dans le mémoire de thèse de Sandrine ALIZIER (bourse à 50 % Seine-Aval) qui a été soutenue à l'Université de Lille 1 le 15 décembre 2011. La thèse porte sur l'analyse des campagnes historiques notamment les campagnes historiques PECTOW et les campagnes COLMATAGE 2008 et 2009. Le mémoire est fourni en annexe de ce rapport et seuls les points forts sont rappelés plus loin. Pour la campagne 2010, seule la CSLN est intervenue sur un nombre limité de stations du secteur ouest de la zone de chalutage, la CSLN couvrant les autres parties de la zone pendant d'autres opérations contractuelles. Il a été convenu de mutualiser les données qui seront réunies dans la base MABES par le GIP. La CSLN est également intervenue pour des activités le tri d'une vingtaine de stations de la campagne 2008 et de la totalité de celle de 2009.

Outre les résultats acquis sur les habitats de sédiments meubles du secteur COLMATAGE, des opérations connexes ont également été entreprises au cours du projet 2007-2011 dont des actions sur les *Ophiothrix*, les nouvelles espèces introduites en baie de Seine orientale et sur les observations au ROV qui viennent compléter les données des prélèvements ponctuels à la benne.

##### 4.1. Achat et utilisation d'un système de vidéo sous-marine ROV SeaBotix LBV 200 L<sup>2</sup>

L'imagerie sous marine est une technique d'échantillonnage de terrain, non destructive, et de plus en plus couramment utilisée dans les évaluations biologiques des habitats. Après visite du salon océanographie 'Oceanology International 2008' de Londres en mars 2008, le choix s'est porté sur un ROV Seabotix LBV 200 L<sup>2</sup>. L'achat a été réalisé en cofinancement Seine-Aval de 24000 euros, du Bonus Qualité Recherche USTL de 20000 euros et de l'Equipe Biodiversité et Climat du LOG, 6000 euros pour un total de 50000 euros. Une formation de trois jours a été suivie par trois membres de l'UMR LOG (prise en charge de la formation par le CNRS et Université de Lille 1) puis de deux nouveaux utilisateurs de l'UMR M2C (prise en charge de la formation par le CNRS et l'UCBN) afin d'assurer la continuité d'utilisation de l'équipement, auprès de SeaScape, correspondant européen aux Pays-Bas de la compagnie SeaBotix où l'équipement a été acheté.



Le ROV LBV200<sup>2</sup>L Seabotix peut aller jusqu'à une profondeur de 200 m (250 m de câble) et pèse 12 kg (Figure 36). Il est équipé de quatre moteurs : trois horizontaux (deux à l'arrière et un latéral) et un vertical. La vitesse de l'engin est réglable et peut aller jusqu'à trois nœuds en surface. Il est équipé de deux caméras, une principale couleur et une secondaire noir et blanc. Les caméras sont orientables sur 180° à la verticale. L'image est transmise vers le boîtier de contrôle par la fibre optique. Le système est équipé d'une lampe interne suivant la caméra et d'intensité variable ainsi que de quatre lampes externes disposées sur les patins à l'avant du ROV (Figure 36). Il y a également deux lasers entourant la caméra couleur et se déplaçant avec elle. Ils sont espacés de 5 cm. L'engin dispose également d'un système donnant le positionnement relatif du ROV par rapport au bateau (tracking system) : le Trittech MicronNav100.



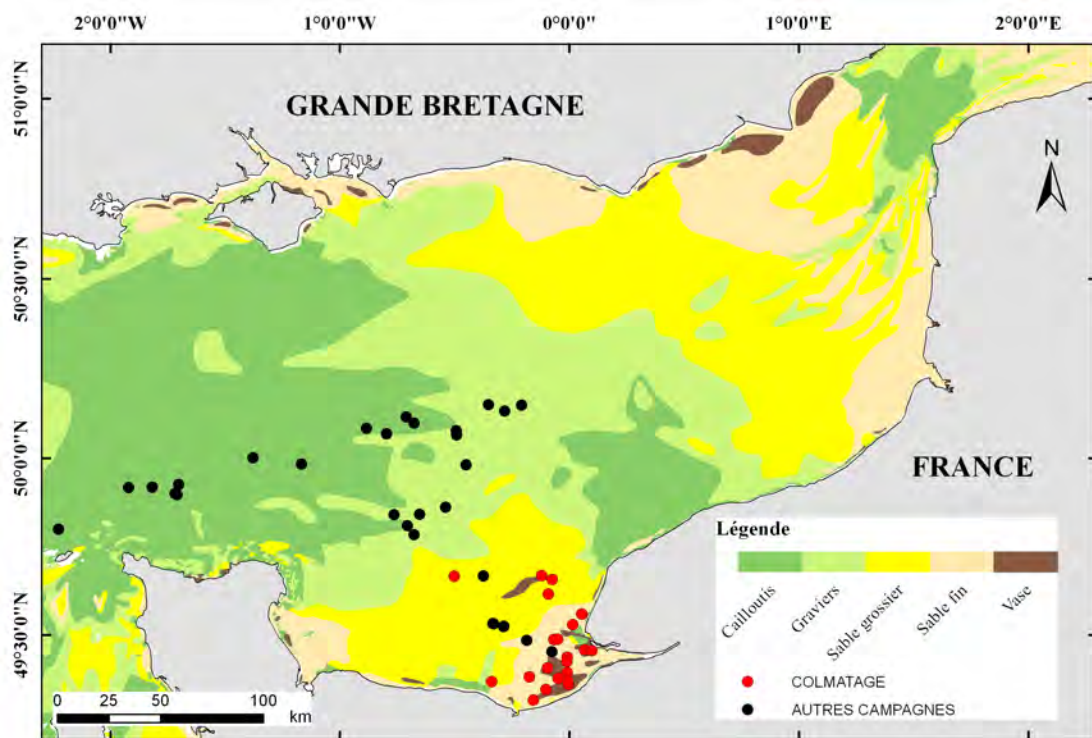
**Figure 36.** Equipement vidéo avec le ROV (sans les lampes externes) et son ombilic à gauche, et à droite de haut en bas, l'installation dans le laboratoire à bord du « Côtes de la Manche » (crédit photo Olivier Dugornay), le boîtier de commande et le système de positionnement (Trittech Micronav100) (Crédit photos : Sophie Lozach).

La campagne en mer COLMATAGE réalisée au mois d'octobre 2009 a permis de faire les premiers essais en mer dans la partie orientale de la baie de Seine (deux sites un sur les sables fins peu envasés face à Deauville et le second sur les fonds à *Ophiothrix* au large d'Antifer). Les observations ont été très concluantes quand à la qualité des images obtenues. Cependant l'expérimentation a révélé un grand nombre de contraintes quand à l'utilisation d'un tel engin dans des zones à fort hydrodynamisme. Le ROV Seabotix LBV200L<sup>2</sup> a des moteurs puissants ce qui permet de le déplacer dans des conditions hydrodynamiques variables. Cependant il perd de la manœuvrabilité quand les courants de surface sont supérieurs à 0,5 nœud. De plus, l'ombilic est entouré d'une gaine de plastique avec une flottabilité légèrement positive et le câble subit un effet de drague dans l'eau et tend à se dérouler alors que le ROV est encore à une distance proche du bateau. Cet effet est d'autant plus important que le courant de surface est fort. Pour ces raisons, et dans l'optique de pouvoir manœuvrer le ROV suffisamment longtemps pour avoir des observations pertinentes du fond, il est indispensable de travailler lors de l'étable, quand les courants sont inférieurs à 0,5 nœud. L'idéal est de travailler en plus, navire à l'ancre, pour éviter d'ajouter l'effet du courant à la dérive du bateau. Une fois le ROV au fond l'enregistrement sera de 10 à 20 min pour parcourir environ 200 m, en maintenant au mieux la direction pour ne pas repasser plusieurs fois au même endroit. Ensuite il faut maintenir une vitesse constante lors de l'exploration et se poser sur le sédiment pendant quelques secondes de manière aléatoire afin d'obtenir des images 'fixes' du sédiment et de la faune en présence et de manière à ce que cela soit représentatif de la station explorée. La meilleure orientation de la caméra est vers le fond à ~45° de l'horizontale. Les lasers et les lumières externes et internes doivent être en permanence allumés.

Les séquences vidéo apportent une information sur la mégafaune et une partie de la macrofaune visible en surface et sur la dispersion des organismes (ce qui explique les variabilités observées dans les échantillons, très utiles pour interpréter les types d'habitats). Ces espèces de la mégafaune peuvent représenter des biomasses importantes et être caractéristiques de certains environnements. Ainsi, les observations vidéo, au ROV par exemple semblent être un bon complément pour l'estimation des densités des espèces surdispersées. Ce protocole, recommandant l'association des techniques de prélèvement à la benne et les techniques vidéo, est également valable pour les espèces de l'épifaune présentant une surdispersion des individus dans une population donnée. C'est le cas de l'espèce *Ophiothrix fragilis*, largement représentée en Manche sur les sédiments grossiers de la Baie de Seine et du détroit du Pas de Calais (voir ci-dessous), mais également pour des espèces qui 'échappent' à la récolte par leur mobilité telles que *Pagurus* spp. ou *Aequipecten opercularis*,

ou leur sous-dispersion *Necora puber*, *Cancer pagurus* et *Asterias rubens* (Lozach, 2011). La mégafaune dispersée représente une partie de la faune difficilement échantillonnée à la benne mais qui reste accessible par des techniques d'observation vidéo.

Une série d'observations vidéo ont été réalisées entre 2008 et 2011 à l'aide du ROV Seabotix le long du gradient sédimentaire depuis l'embouchure de l'estuaire de la Seine vers le large. Différents environnements sédimentaires ont ainsi été observés dans la partie orientale de la baie de Seine correspondant à la zone COLMATAGE (vase sableuses, sables vaseux, sables fins et sédiments hétérogènes) mais également vers le large dans des sédiments plus grossiers (gravier sableux et cailloutis), dans le cadre d'autres campagnes d'échantillonnage benthique (Figure 37). L'objectif était d'avoir une base de données d'observations vidéo des différents habitats benthiques du bassin oriental de la Manche et de la baie de Seine pour juger de l'importance de l'épifaune et de la mégafaune dispersée dans leur description. Les vidéos montrent une forte homogénéité des profils sédimentaires de surface et de la composition faunistique dans la zone COLMATAGE.



**Figure 37.** Carte de l'ensemble des observations ROV réalisées dans le bassin oriental de la Manche à l'aide du ROV Seabotix, dans différents types sédimentaires [fond de carte simplifié à partir des travaux de Larssonneur (1982)].



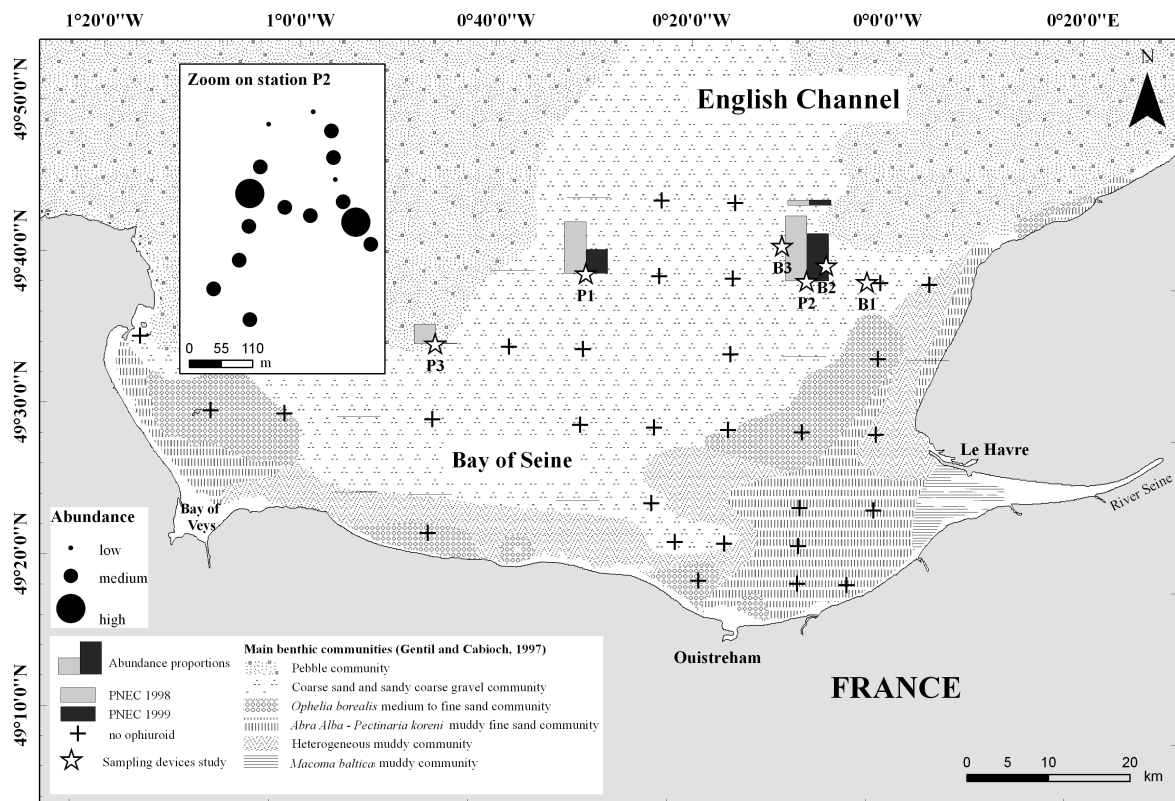
Cette approche complémentaire d'observation de surface sera croisée à la fois avec les données benthos de COLMATAGE (campagnes 2008-2010) et celles réalisées dans d'autres programmes de recherche dont le projet INTERREG CHARM 3 (post doctorat de S.Lozach en cours jusqu'en juillet 2012). L'objectif est d'exploiter la totalité des observations dans le contexte du gradient bio-sédimentaire de l'ensemble de la baie de Seine.

#### 4.2. Analyse expérimentale des processus fins du rôle des structures biogéniques dans les processus de sédimentation

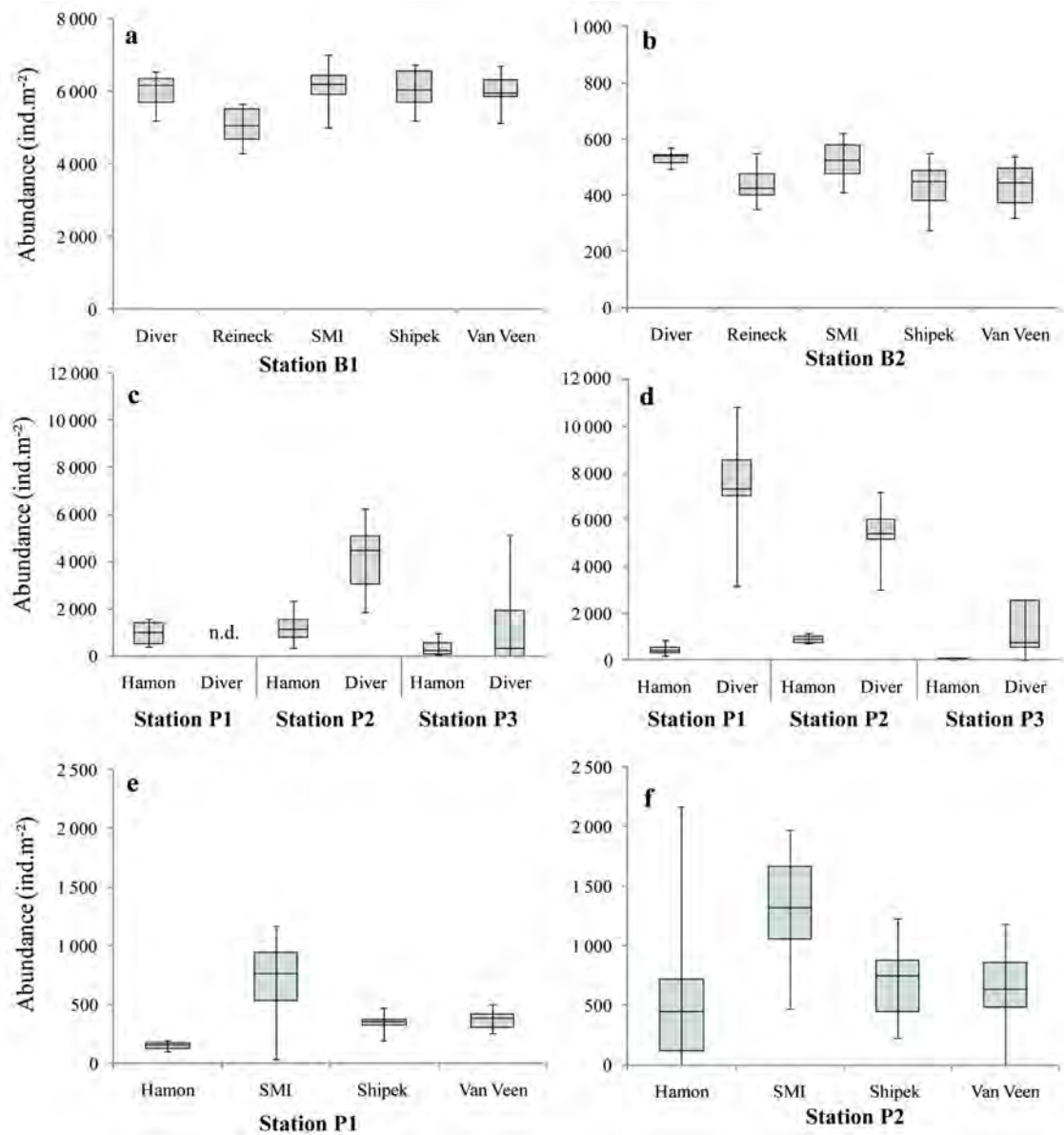
L'échinoderme *Ophiothrix fragilis* est une espèce benthique, agrégée en bancs dans des zones à fort hydrodynamisme, caractéristique des zones de cailloutis et de sédiments grossiers de la baie de Seine et plus largement de la Manche Orientale. C'est un suspensivore passif qui se nourrit dans la colonne d'eau en collectant les matières en suspension à l'aide de ses bras dressés face au courant qui agit ainsi comme pièges à particules. Il y a une relation complexe entre les ophiures et les processus hydrologiques et sédimentaires en couche limite de fond. L'expérimentation en canal à courant de la Station Marine de Wimereux en 2007 a permis de mesurer à petite échelle temporelle l'influence des ophiures et de dissocier les processus mis en jeu dans les couplages benthopélagiques à partir de plus de 40 expériences, testant la densité des ophiures, le substrat et les vitesses de courant. Ainsi il a été observé que *O. fragilis* participe à un transfert de matière vers le fond équivalent à son taux de rejet particulaire (Rapport Master 2 de S. Lozach). L'expérimentation a montré que ces processus étaient significatifs pour de fortes densités : 5000 ind.m<sup>-2</sup>. D'autre part, par son comportement face aux variations d'intensité du courant, l'espèce va limiter la remise en suspension de sédiments fins. Le couplage de ces processus en milieu naturel peut induire l'accumulation de matériel sédimentaire fin sous les bancs denses d'*O. fragilis* comme cela a été observé par l'équipe 4 au large du Port d'Antifer (Méar et al., 2006). Cette espèce a donc un rôle significatif dans les dépôts sédimentaires à l'interface eau/sédiment à petite échelle de temps et d'espace particulièrement dans le cas de populations très denses. En influençant les processus sédimentaires à petite échelle, *O. fragilis* peut altérer de manière significative la géomorphologie et les processus sédimentaires sur le fond en agissant sur de longues périodes de temps et à ce titre elle serait une espèce ingénieure.

#### 4.3. Echantillonnage des *Ophiothrix* en baie de Seine

Une publication Lozach et al. (2011). Sampling Epifauna, a Necessity for a Better Assessment of Benthic Ecosystem Functioning: An Example of the Epibenthic Aggregated Species *Ophiothrix fragilis* from the Bay of Seine' parue dans Marine Pollution Bulletin discute de la difficulté à estimer les abondances de l'ophiure *Ophiothrix fragilis*. Dans cette note qui réunit des données acquises auparavant en baie de Seine dans le cadre de projets antérieurs mais aussi dans COLMATAGE, il est déconseillé d'utiliser une benne Hamon 0,25m<sup>2</sup> mais plutôt une benne de type Smith McIntyre. L'alternative de prélèvements en plongée donne de meilleure estimation ; les images du ROV peuvent également être utilisées pour des estimations dans les zones fortement colonisées (Figures 38 et 39).



**Abstract :** Sampling the sea bottom surface remains difficult because of the surface hydraulic shock due to water flowing through the gear (i.e., the bow wave effect) and the loss of epifauna organisms due to the gear's closing mechanism. Slow-moving mobile epifauna, such as the ophiuroid *Ophiothrix fragilis*, form high-density patches in the English Channel, not only on pebbles like in the Dover Strait or offshore Brittany but also on gravel in the Bay of Seine ( $> 5000 \text{ ind.m}^{-2}$ ). Such populations form high biomasses and control the water transfer from the water column to the sediment. Estimating their real density and biomass is essential for the assessment of benthic ecosystem functioning using trophic web modelling. In this paper, we present and discuss the patch patterns and sampling efficiency of the different methods for collecting in the dense beds of *O. fragilis* in the Bay of Seine. The large Hamon grab ( $0.25 \text{ m}^{-2}$ ) highly under-estimated the ophiuroid density, while the Smith McIntyre appeared adequate among the tested sampling grabs. Nowadays, diving sampling, underwater photography and videos with Remote Operated Vehicle appear to be the recommended alternatives to estimate the real density of such dense slow-moving mobile epifauna.

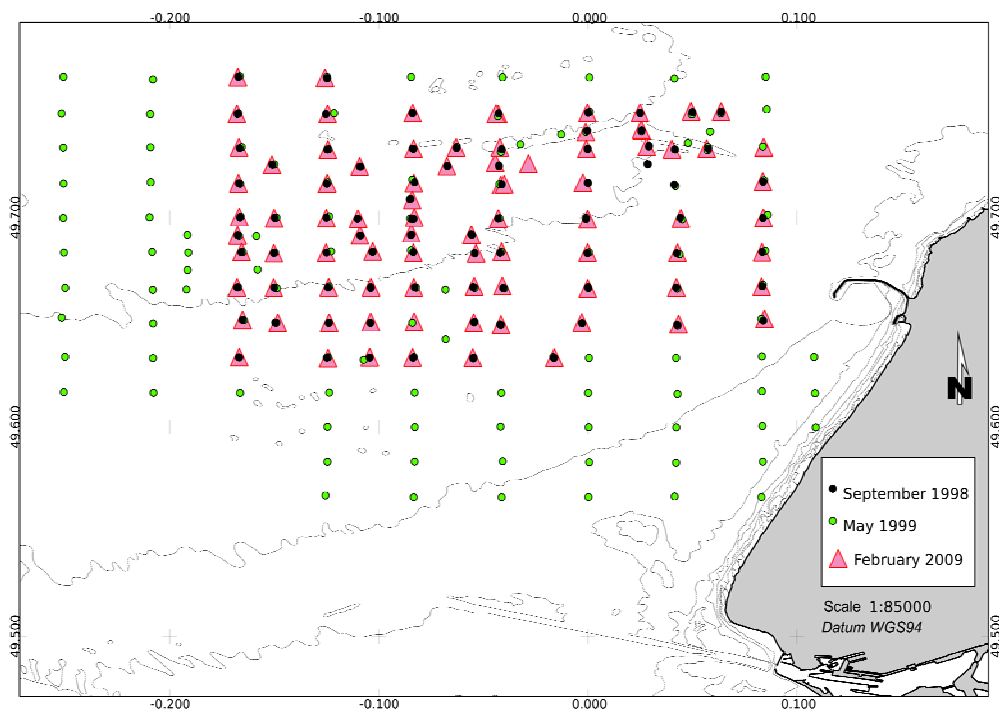


**Figure 39.** Box plots des abondances d'*Ophiothrix fragilis* pour les sites B1 (a) et B2 (b) des campagnes BIOGEOCHIMIE ; aux sites P1, P2 and P3 des campagnes PNEC 1998 (c) et 1999 (d) puis aux sites P2 (e) et P1 (f) de la campagne COLMATAGE. Les box plot indiquent le 1<sup>er</sup> quartile, la médiane, le 3<sup>ème</sup> quartile et les valeurs d'abondances minimum et maximum à chaque station.

#### 4.4. Etude des relations entre les populations d'Ophiures et le sédiment

Compte tenu du nombre important de données sur la région du nord-est d'Antifer dans une zone colonisée par d'importantes populations de l'ophiure (*Ophiotrix fragilis*), il a été choisi de faire une étude des relations existantes entre les populations d'ophiures et le sédiment. Pour réaliser ce travail, la base de données « Sédimentologie » mise en place dans la première partie du programme Colmatage et en particulier les informations relatives au taux de fraction fine (TF<sup>2</sup>) a été exploitée. A ces informations, sont jointes les données analytiques obtenues en 2010. Ces données portent essentiellement sur la qualité du sédiment avec la mesure du taux du Carbone Organique Total (COT) et du Soufre Total (ST).

Différentes cartographies des populations d'ophiures réalisées à partir des données obtenues lors des missions menées par le groupe GEOCEANO en baie de Seine orientale au large du port d'Antifer sont présentées en annexe dont quelques une sont données ici (Figure 40).



**Figure 40.** Exemple de régions étudiées à travers les données acquises au cours des missions de cartographie réalisées en septembre 1998, mai 1999 et février 2009.

Le faciès « vases noires » rassemble tous les échantillons prélevés, entre 1990 et 1999, sur la zone d'Antifer. Les vases noires ne sont donc pas représentatives d'un forçage environnemental particulier. Ce faciès sédimentaire est constitué par des vases compactes de couleur noire et généralement odorantes à cause du dégagement d'H<sub>2</sub>S. Très rarement, ces

vases peuvent être recouvertes d'un liseré de vase oxydée. Il n'est cependant pas possible de savoir si son absence éventuelle est liée à un non dépôt, une érosion ou bien à une mauvaise manipulation lors du prélèvement. Pour toutes les missions prises en compte dans cette étude, les prélèvements ont été réalisés au moyen d'une benne de type Shipek dont les dimensions du godet de prélèvement sont de 20 cm par 20 cm. Le nombre d'ophiures observées dans chaque prélèvement est multiplié par 25 pour obtenir la densité par  $m^2$ . Il est donc normal de ne pas trouver des nombres d'ophiures inférieurs à 25. Pour replacer, dans leur contexte environnemental, les échantillons prélevés au cours des différentes missions prises en compte dans ce travail, des indices « Crue » et « Houle » ont été calculés. Une crue est caractérisée par un débit supérieur à  $1000 m^3.s^{-1}$ . Une tempête est individualisée lorsque la valeur Hmo dépasse 4 m. Pour les deux forçages, le temps séparant l'événement (crue ou tempête) et le début de la mission est calculé. Pour la crue, le volume d'eau est déterminé sur la base du débit moyen et de la durée de la crue. Le paramètre « Crue » est calculé en divisant le volume d'eau amené par la crue par l'intervalle de temps séparant la crue du début de la mission. Le paramètre « Houle » est calculé en divisant la Hmo maximale de l'épisode tempétueux par l'intervalle de temps séparant la tempête du début de la mission. Des coefficients de normalisation sont ensuite appliqués pour obtenir des gammes de valeurs comparables. Le tableau 4 présente les caractéristiques des forçages pris en compte pour les missions considérées dans cette étude.

**Tableau 4.** Place des missions dans le contexte des forçages environnementaux (houle et crue de la Seine).

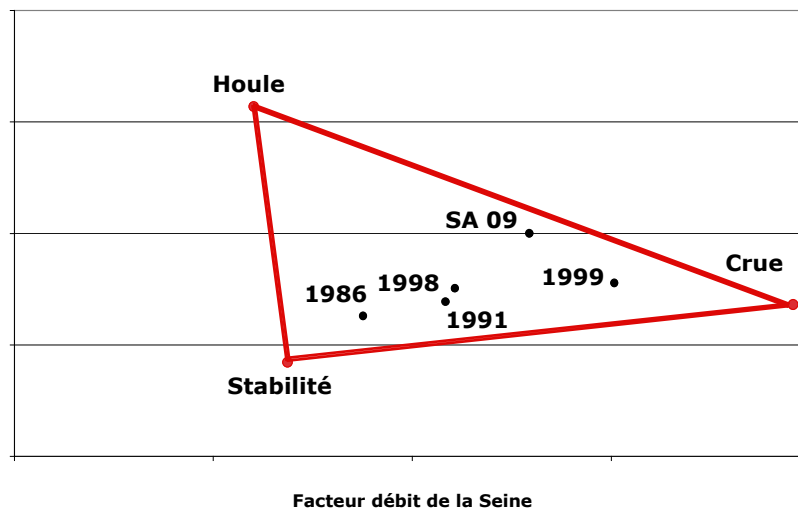
Nom série	Date prélèvement	Débit Seine			Tempête	
		Débit maximum de la crue ( $m^3/s$ )	Volume de la crue ( $m^3$ )	Temps depuis la crue (jours)	Hmo (m)	Temps depuis la tempête (jours)
1986	Septembre 1986	1172	794880000	140	4,2	232
1991	Juillet 1991	1512	2358720000	160	4,1	169
1998	Septembre 1998	1359	1952640000	119	4,7	147
1999	Mai 1999	1338	1560384000	15	4	112
SA09	Février 2009	1490	1167091200	30	4,3	43
Crue	Avril 1999	1560	4103827200	5	4,5	197
Houle	Février 1990	1207	684633600	428	4,1	3
Stabilité	Octobre 1989	1207	684633600	289	4,6	661
Vases noires	1990-2009					

Le tableau 5 présente les deux paramètres calculés (Crue et Houle) pour chacune des missions prises en compte dans cette étude. Les missions notées Crue, Houle, Stabilité et Vases noires sont respectivement caractéristiques des forçages indiqués dans leur dénomination ou du faciès sédimentaire pris en compte.

**Tableau 5.** Paramètres Crue et Houle caractéristiques des missions analysées.

Nom série	Date prélèvement	Paramètre crue	Paramètre houle
1986	Septembre 1986	56,8	18
1991	Juillet 1991	147,4	24
1998	Septembre 1998	164,1	32
1999	Mai 1999	1040,3	36
SA09	Février 2009	389,0	100
Crue	Avril 1999	8207,7	23
Houle	Février 1990	16,0	1367
Stabilité	Octobre 1989	23,7	7
Vases noires	1990-2009		

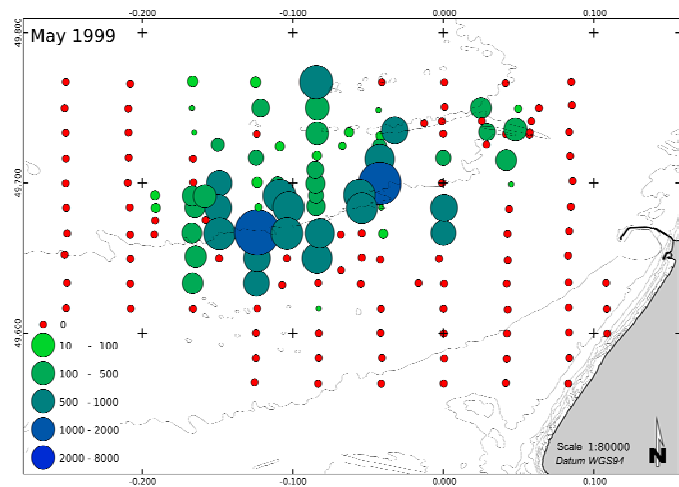
La figure 41 permet de replacer l'ensemble des jeux de données analysés dans le contexte environnemental régnant au moment du prélèvement des échantillons. Les différentes missions « cartographiques » aux deux échelles prise en compte (ensemble de la baie de Seine et zone atelier d'Antifer) se situent à l'intérieur d'un triangle dont les trois sommets caractérisent des conditions environnementales où 1) la houle est le facteur dominant, 2) la crue est importante, 3) une période de stabilité pour laquelle la dernière crue et la dernière tempête sont lointaines.

**Figure 41.** Influence relative des forçages environnementaux (houle et crue de la Seine) lors des missions de prélèvement.

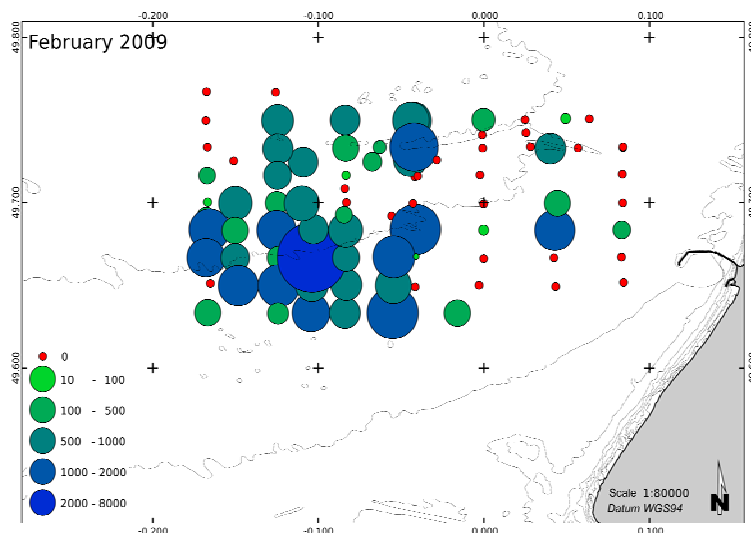
Les « patches » d'ophiures qui ont au maximum quelques kilomètres de largeur peuvent être caractérisés par des populations d'ophiures de plusieurs milliers d'individus par m<sup>2</sup>. Entre les patches, il n'est pas rare d'échantillonner des sédiments pour lesquels les ophiures sont

absentes. Malgré le grand effort d'échantillonnage réalisé, le plan d'échantillonnage n'est pas suffisant pour obtenir une cartographie spatiale correcte.

A titre d'exemple, en mai 1999, la densité maximale est de 1800 ind.m<sup>2</sup> (Figure 42). Dix ans plus tard (février 2009), la distribution spatiale est assez similaire à la distribution de 1999 (Figure 43). La densité maximale est d'environ 3400 ind.m<sup>2</sup>. Cependant, l'alignement sur la ligne bathymétrique des 30 m est moins marqué. La tache principale est à la fois descendue vers le Sud et découpée en deux sous-taches. Pour la première fois, depuis 1986, des profondeurs plus faibles (25 m) sont occupées par les ophiures. Au nord du banc d'Antifer, la population d'ophiures apparaît beaucoup plus dense et spatialement plus importante.



**Figure 42.** Cartographie des populations d'ophiures au large d'Antifer (mai 1999).



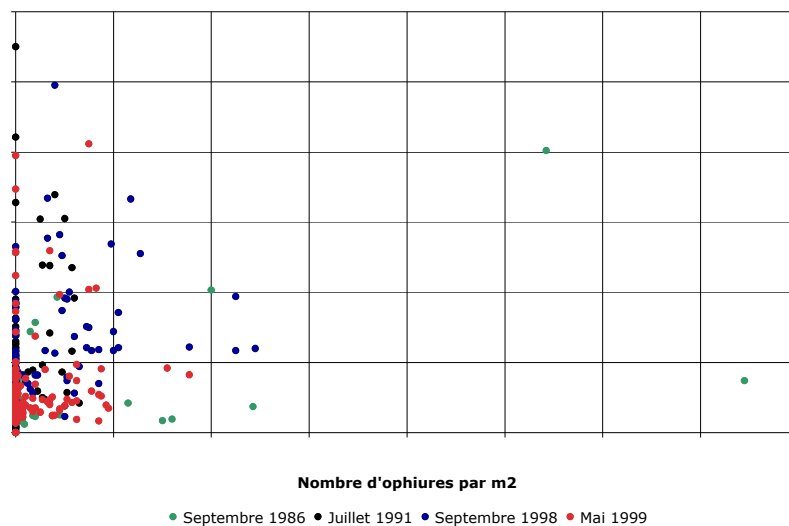
**Figure 43.** Cartographie des populations d'ophiures au large d'Antifer (février 2009).



### *Relation entre taux de fraction fine et populations d'ophiures*

Le taux de fraction fine représente ce qui est classiquement considéré comme « l'envasement ». Dans cette étude, ce paramètre représente le pourcentage de la fraction de sédiment dont les particules ont une taille inférieure à 63 microns. Ce paramètre est mesuré à la suite d'un tamisage humide et par différence de poids entre le sédiment total et la fraction supérieure à 63 microns (maille du tamis). Sur la figure 44, il a été reporté les informations disponibles pour les missions réalisées en 1986, 1991, 1998 et 1999.

Le taux de fraction fine varie entre environ 1 % et plus de 55 %. La majorité des échantillons analysés comporte moins de 20 % de fraction fine. Les teneurs supérieures à 30 % sont relativement rares. Pour toute la gamme des teneurs en fraction fine, il est possible de trouver des échantillons pour lesquels les ophiures sont absentes. Les faciès vaseux ne sont donc pas systématiquement associés à la présence d'ophiures. Cependant, la proportion d'échantillons associés à des populations d'ophiures augmente avec le pourcentage de fraction fine. Pour les sédiments contenant moins de 5 % de fraction fine, seuls 19 % des échantillons sont associés à des ophiures. Ce pourcentage augmente jusqu'à atteindre 75 % des échantillons quand le taux de fraction fine dépasse 20 %. Au-delà de ce taux, il se stabilise aux environs de 70 %.



**Figure 44.** Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m2 (ensemble de la baie de Seine et zone d'Antifer).

La série de données utilisée montre que les populations d'ophiures sont extrêmement variables dans la zone étudiée avec des valeurs s'étendant de 0 à plus de 7500 individus par m<sup>2</sup> pour la mission de septembre 1986. Cette dernière valeur est cependant exceptionnelle. Les abondances maximales sont plutôt de l'ordre de 1500 à 2500 individus par m<sup>2</sup>. En

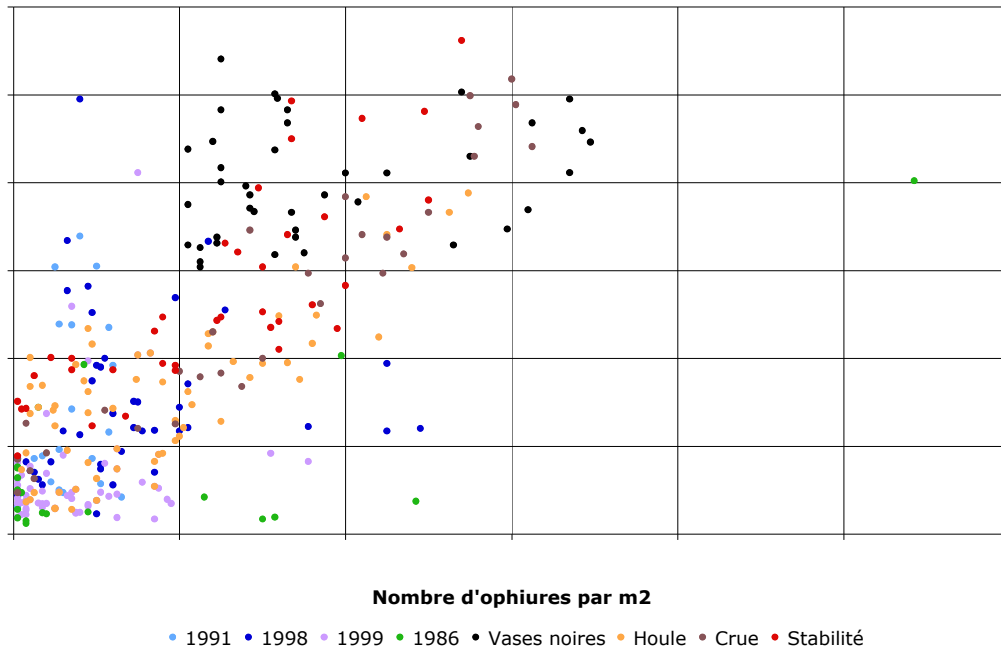
moyenne, elles semblent plus élevées en 1986 puis en 1998 et 2009 et décroissent en 1999. La densité la plus faible est notée en juillet 1991.

La figure 45 présente l'ensemble des données obtenues au cours des différentes missions réalisées entre septembre 1986 et mai 1999. Pour faciliter la lecture du graphique et l'interprétation du jeu de données, seules les stations pour lesquelles la présence d'ophiures a été notée sont prises en compte. Une augmentation du taux de fraction fine accompagne l'accroissement des densités d'ophiures. Pour des densités inférieures à  $250 \text{ ind.m}^{-2}$ , le taux de fraction fine est toujours inférieur à 20 %. A l'autre extrémité de la distribution, les fortes densités d'ophiures ( $> 2500 \text{ ind.m}^{-2}$ ) sont caractérisées par de forts taux d'envasement ( $> 30\%$ ) (Tableau 6).

**Tableau 6.** Nombre et pourcentage d'échantillons de sédiments colonisés par les ophiures en fonction du taux de fraction fine.

Fraction fine (%)	Nombre total d'échantillons	Echantillons avec ophiures Nombre	Echantillons avec ophiures Pourcentage
0-5	310	60	19
5-10	137	42	31
10-15	40	18	45
15-20	23	12	52
20-25	8	6	75
25-30	9	6	67
30-35	7	5	71
35-40	1	0	0
40-45	3	2	67
45-50	1	1	100
50-55	1	0	0

Une analyse fine de la relation entre taux de fraction fine et ophiures a été menée en prenant en compte les périodes de crue, de tempête, de stabilité et les vases noires. De plus, les relations entre Carbone Organique Total, Soufre Total et ophiures complètent l'analyse (voir Annexe 1).



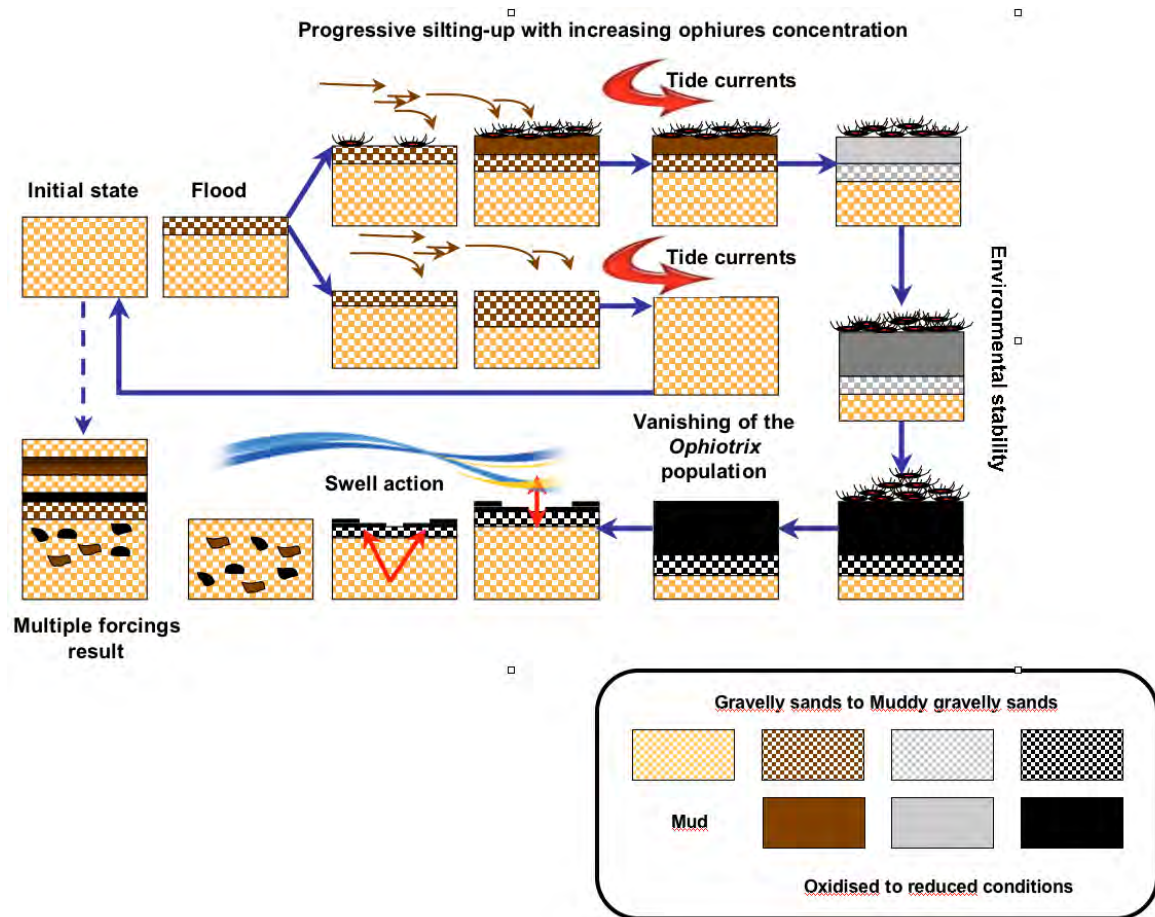
**Figure 45.** Relation entre taux de fraction fine et nombre d'ophiures par m<sup>2</sup> (détail).

En conclusion, à l'issue de cette analyse entre environnement sédimentaire et populations d'*Ophiothrix*, il est possible de dresser un scénario pour l'évolution des fonds marins situés au large du port d'Antifer. Dans cette zone, les sédiments sont essentiellement constitués par des sables fins contenant une fraction plus ou moins importante de graviers voire de galets. Sur ces sédiments grossiers, les crues de la Seine sont responsables d'un envasement qui reste majoritairement superficiel. Cependant, sous l'action des agents hydrodynamiques, une partie non négligeable de ces sédiments fins arrive à « percoler » dans la matrice plus grossière. Lorsque une population d'ophiures s'implante sur ce substrat, l'envasement augmente progressivement. Les agents hydrodynamiques ont alors une moindre emprise sur le sédiment. Les vases apparaissent plus compactées et les ophiures constituent un obstacle très efficace pour empêcher l'érosion des particules sédimentaires. Progressivement le taux de fraction fine piégée à l'interface eau-sédiment augmente. Cet envasement est accompagné par une accumulation de matières organiques liées aux apports marins, continentaux et à la production locale. Le faciès sédimentaire se caractérise par une profonde couleur noire (Figure 46).



**Figure 46.** Envasement progressif des fonds à ophiures s'accompagne d'un profond changement de couleur (beige -> noire).

Ce n'est que lorsque les agents hydrodynamiques sont très puissants (tempête avec forte houle accompagnée d'une vive eau) que l'ensemble population d'ophiures et couverture sédimentaire superficielle est remaniée. Dans ce cas, des nodules de vases indurée (de couleur beige et /ou noire) sont pris dans la matrice sédimentaire. Le nombre d'ophiures par m<sup>2</sup> diminue drastiquement et peut même disparaître. Lorsque les vases se sont déposées après une forte crue et caractérisent donc ce type d'apport ; leur prélèvement par benne Shipek est complexe du fait du contraste de cohésion entre les deux types de vases. L'ensemble des observations portant sur l'évolution de la nature et de la qualité des fonds marins situés au large d'Antifer peuvent être résumé par le modèle présenté à la figure 47.

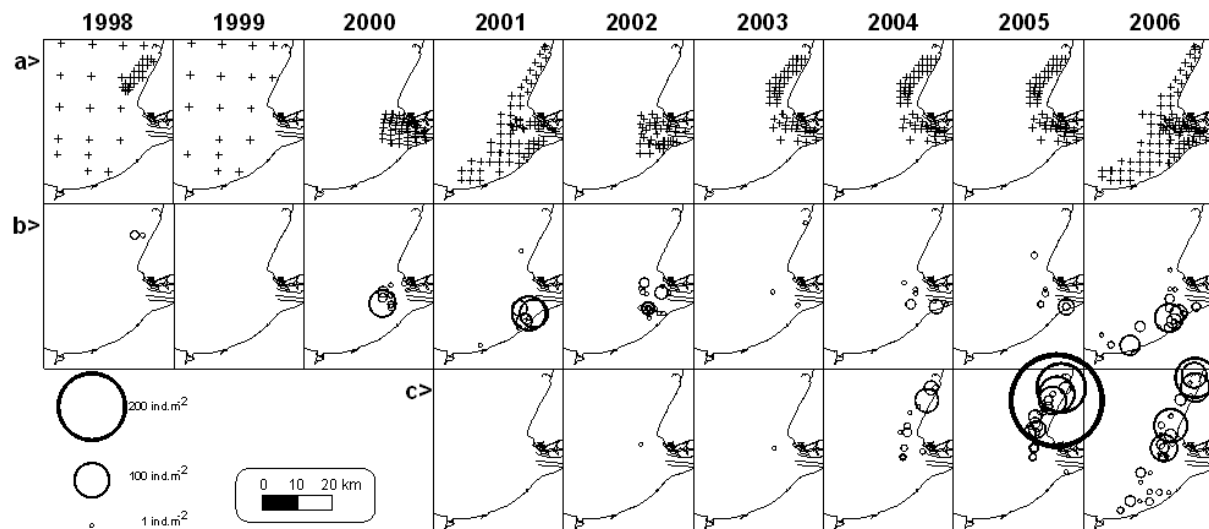


**Figure 47.** Modèle d'évolution des fonds de la baie de Seine sous la quadruple action des apports fluviaux de la Seine, des courants de marée, de la houle et d'une forte population d'ophiures.

#### 4.5. Nouvelles espèces pour la partie orientale de la baie de Seine

##### *Melinna palmata* et *Ensis directus*

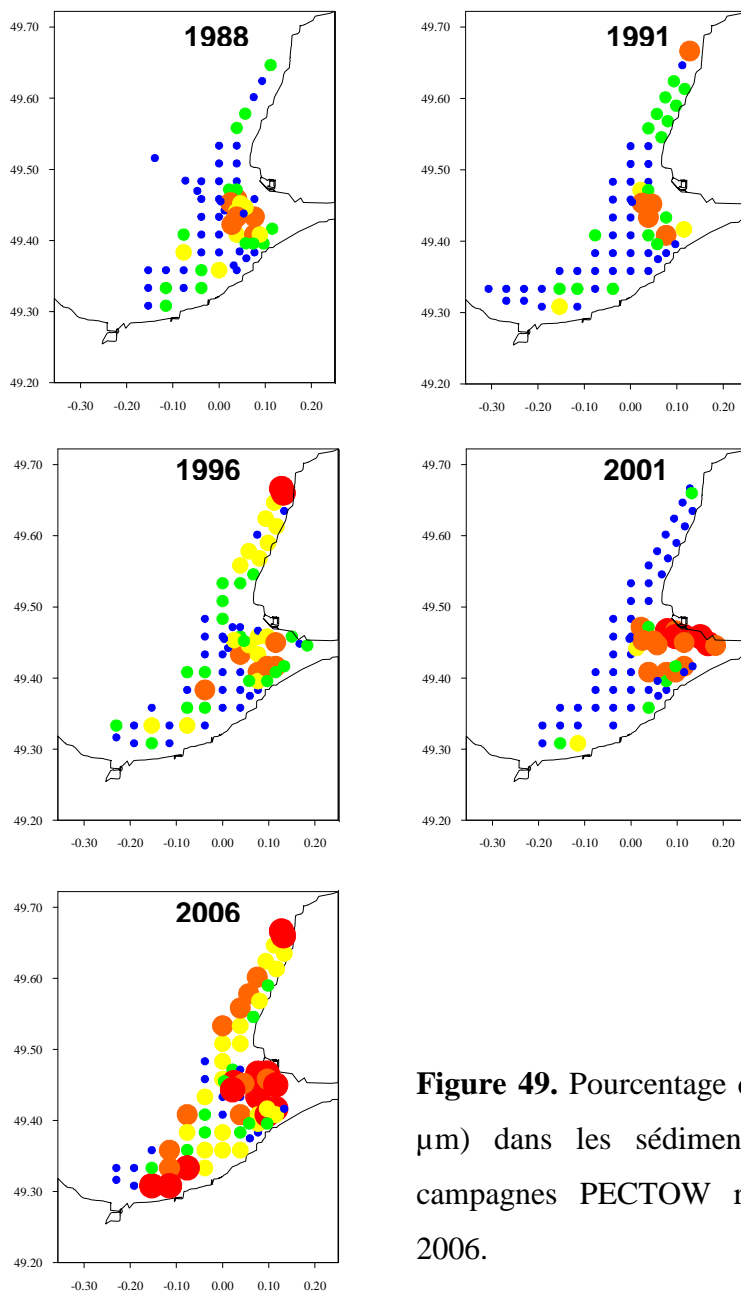
Une publication de Dauvin et al., 2007 'The presence of *Melinna palmata* (Annelida: Polychaeta) and *Ensis directus* (Mollusca: Bivalvia) related to granulometry changes in the Bay of Seine' parue dans les Cahiers de Biologie Marine illustre la mise en commun des données historiques acquises sur les communautés de substrat meuble de la partie orientale de la baie de Seine et un exemple d'exploitation de la base de données MABES. Il est proposé que l'établissement du polychète *Melinna palmata* s'inscrive dans le processus d'envasement de la zone subtidale de cette partie orientale de la baie (Figure 48).



**Figure 48.** Stations benthiques échantillonnées entre 1998 et 2006 (a) et abondance en ( $\text{ind.m}^{-2}$ ) de *Ensis directus* (b) et *Melinna palmata* (c).

**Résumé :** Plusieurs récoltes des deux espèces *Melinna palmata* (annélide polychète) et *Ensis directus* (mollusque bivalve) ont été effectuées dans la partie orientale de la baie de Seine depuis la fin des années 1990, indiquant un changement récent de la faune benthique de cette région. *M. palmata* n'avait jamais été signalée en baie de Seine, alors que des populations sont florissantes dans les vases sableuses des fonds de baies de la Manche occidentale le long des côtes françaises (e.g. dans la voisine Rade de Cherbourg), et dans toutes les baies côtières du sud de l'Angleterre (e.g. la plus proche dans la Rade du Solent, Southampton). La récolte d'une population abondante d'*E. directus* en 2006 confirme son implantation qui avait été observée pour la première fois en 1998. L'introduction de *M. palmata* est probablement liée à

un envasement récent de la partie orientale de la baie, alors que celle d'*E. directus* est liée à la progression vers le sud-ouest (de l'estuaire de l'Escaut à l'estuaire de la Seine) de cette espèce invasive (Figure 49). Pour ces deux espèces à cycle-bentho-pélagique, la colonisation de la Baie de Seine peut résulter d'un apport larvaire naturel depuis des populations voisines ou d'une introduction accidentelle due à l'homme (i.e., eaux de ballasts).

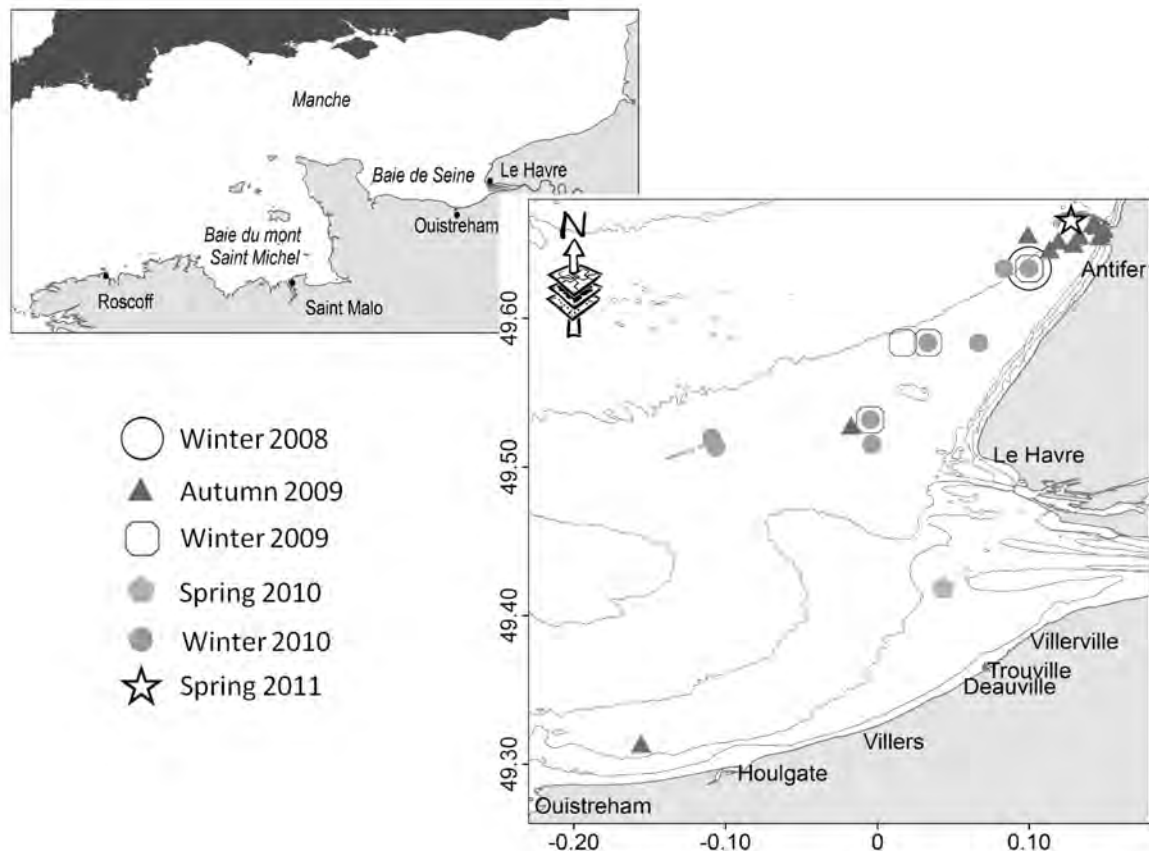


**Figure 49.** Pourcentage de particules fines (< 63 µm) dans les sédiments provenant des cinq campagnes PECTOW réalisées entre 1988 et 2006.



*Asthenognathus atlanticus*

Une publication Jourde et al. est sous presse dans les Cahiers de Biologie Marine ‘First and repeated records of the tropical-temperate crab *Asthenognathus atlanticus* Monod, 1932 (Decapoda: Brachyura) in the eastern part of the Bay of Seine (eastern English Channel, France)’ illustre la progression en Manche d’une espèce Atlantique (Figure 50).



**Figure 50.** Carte des stations de la partie orientale de la baie de Seine au niveau desquelles *Asthenognathus atlanticus* a été échantillonné

**‘Résumé :** La présence d'*Asthenognathus atlanticus* Monod, 1932, est signalée pour la première fois dans la partie orientale de la baie de Seine (Manche orientale). Un total de 30 individus a été échantillonné entre 2008 et 2011 le long des côtes normandes entre Ouistreham et Antifer, principalement sur des vases plus ou moins sableuses, entre 10 et 25 m de profondeur. L'aire de répartition géographique d'*A. atlanticus* s'étendait auparavant le long des côtes Est de l'océan Atlantique, de l'Angola jusqu'à la partie occidentale de la Manche qui constituait la limite septentrionale de cette espèce. Ce crabe était également signalé dans la partie occidentale de la Méditerranée. Les modifications récentes de la composition

sédimentaire des fonds de la baie de Seine orientale ont conduit à la mise en place d'habitats potentiellement favorables pour cette espèce. Cependant, les informations disponibles ne sont pas suffisantes pour établir de manière définitive l'origine des individus récoltés, ni les modalités de leur arrivée en Manche orientale. Plusieurs hypothèses sont évoquées : d'une part une colonisation naturelle par la dispersion de larves originaires des populations de la Manche occidentale et d'autre part, la possibilité d'une origine plus lointaine, l'introduction des individus collectés étant alors liée aux activités humaines. En l'état actuel des connaissances, aucune hypothèse n'est à exclure.

#### 4.6. Réflexion sur la typologie des habitats marins

La classification des habitats marins est un outil prometteur et en évolution pour standardiser le jargon technique et organiser l'information. Cela permet de réduire la complexité du milieu naturel pour le rendre plus compréhensible notamment pour les décideurs et gestionnaires. Ainsi, une bonne classification devrait aider à interpréter les données de manière à produire de l'information et à enrichir les connaissances sur l'environnement marin. Les systèmes de classification doivent être déterminés objectivement et avoir une structure intuitive mais systématique. De cette manière, développer une technique commune de classification des habitats permettrait de comprendre la fonction des écosystèmes à large échelle. Cette réflexion a été présentée au Colloque CARHAMB'AR en février 2009 à Brest. Cette synthèse réalisée dans le cadre du DSR de S. Lozach (2008) abouti aux constats suivants qu'un grand nombre de publications propose des typologies des habitats benthiques mais la plupart ne se réfèrent qu'à un seul descripteur tels que la signature acoustique du fond ou la distribution des communautés biologiques en fonction du type sédimentaire. A l'échelle mondiale, seul un petit nombre de système de classification des habitats benthiques permet de couvrir des étendues assez larges des fonds marins englobant, de ce fait, une certaine diversité de types d'habitats (i.e. des classifications reconnues nationalement au minimum). Cependant, aucun d'entre eux n'est universel car ils ont tous des buts et des avantages propres.

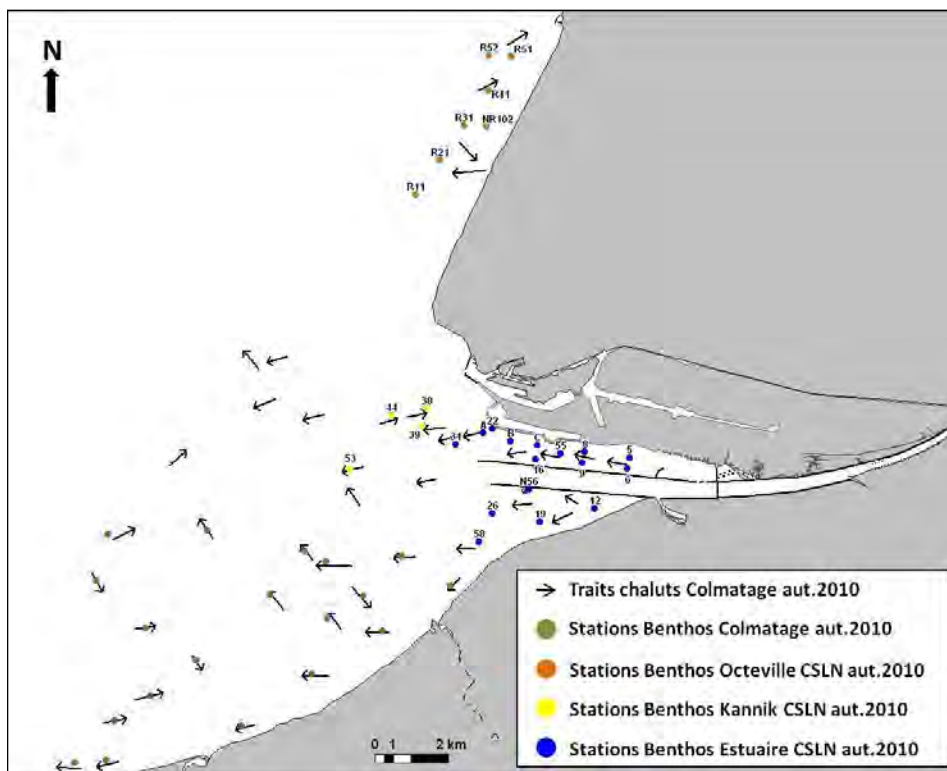
Il a été retenu dans l'analyse huit typologies des habitats benthiques dont les systèmes de classification reposent sur une combinaison de facteurs, d'une part pour leur démarche pluridisciplinaire et d'autre part pour leur notoriété (Lozach, 2008). Les systèmes de classification sont, dans leur ensemble, le résultat d'un travail scientifique basé sur la compréhension des processus influençant la distribution des organismes dans le milieu marin. Il est possible de comparer ces classifications dans leur globalité selon trois aspects. La

classification EUNIS, qui repose sur la typologie JNCC 04.05 est actuellement le système de classification des habitats benthiques le plus vaste, le plus complet et le plus recommandé, permettant d'avoir une cohérence quant à la comparaison des habitats à une échelle européenne et probablement celui qui semble être le mieux adapté pour la baie de Seine.

#### 4.7. Campagne COLMATAGE 2010

Lors de la campagne COLMATAGE 2010, qui s'est déroulée à bord du « Côtes de la Manche » les 04-05/09/2010 19 stations dont 12 stations à cinq réplicats pour l'analyse du benthos (quatre réplicats) et de la granulométrie (un réplicat) et sept stations à un réplicat pour la granulométrie seule ont été visitées (Figure 51).

A l'issue de la phase « laboratoire », 190 espèces ont été déterminées et les abondances sont dominées numériquement par *Owenia fusiformis* et à moindre mesure, *Monticellina* sp. *Owenia fusiformis* et *Magelona filiformis* sont quant à elles les espèces les plus fréquentes en baie de Seine sur les stations étudiées. Enfin, les biomasses découlent exclusivement de cette espèce ingénieuse, *Owenia fusiformis* et à moindre mesure, d'*Echinocardium cordatum*.



**Figure 51.** Compilation des stations benthos CSLN et COLMATAGE sur les chalutages de 2010.

De plus, le nombre de stations prospectées en 2010 ayant été fortement réduit afin de limiter les coûts de COLMATAGE, le plan d'échantillonnage est complété par les études de la CSLN réalisées dans le cadre du suivi Port 2000 et du suivi du site d'immersion d'Octeville (GPMH) ainsi que du suivi du site d'immersion du Kannik (GPMR ; Figure 51). Le choix des stations à intégrer dans la base MABES pour l'automne 2010 se fera de concert avec le GIP Seine-Aval.

#### 4.8. Foraminifères

L'étude des foraminifères a été menée par l'équipe du Professeur Frans Jorriksen de l'Université d'Angers. Le mémoire de Christian Haller est donné en annexe 3. Les stations sont celles de la grille des échantillonnages benthiques de 2008 (Figure 52). Ce travail en cours (non financé par Seine-Aval) a été mené pour comparer à termes les indicateurs macrofaune et foraminifères.

**Abstract.** The data provided by the 3-year survey of foraminiferal assemblages in five selected stations of the Seine estuary eastern Bay of Seine, lead to a series of conclusions about the spatiotemporal dynamics of living assemblages and their relationships with estuarine dynamics. The dominant species living in the Seine Estuary are typical paralic species dominated by *Elphidium excavatum*, *Ammonia beccarii*, and to a lesser extent the agglutinated group around *Psammosphaera*. In areas with highest pressure of water currents, low salinities and large proportions of the sand fraction in the estuary axis (S40, S15, S11) diversities are lowest throughout all seasons. These conditions exclusively favor the presence of *E. excavatum* and *A. beccarii*. The stations in the north and south of the outlet (S7 & S28) show elevated abundances but also high diversities. During seasonal changes these characteristics overlap. These patterns pass on downcore whereas poor surface abundances might be attributed to the high erosional function of the Estuarine Turbidity Maximum or tidal currents. Abundance of living foraminifera could not be directly correlated with seasonal runoff changes. Possibly, foraminiferal reactions to runoff are not immediate enough and superimposed by physico-chemical parameters not incorporated in this study. Debenay et al. (2006) speculates a delayed reaction to altered parameters of less than one month is likely. Hence, attribution to environmental influence is difficult.

#### **4.9. Etat des lieux (2008-2009) du compartiment benthique (macrofaune et sédiments) du système "baie de seine orientale – embouchure" et changements a long terme (1988-2009)**

Extrait de la thèse de S. Alizier qui porte sur deux types d'analyses : 1) la texture et la structure sédimentaires en compléments des travaux réalisés par les sédimentologues et de concert avec eux et 2) les données faunistiques générales. Des développements détaillés sur les assemblages faunistiques et les niches écologiques des espèces se trouvent également dans la thèse (Alizier, 2011) mais ne sont pas repris ici.

##### **4.9.1. Granulométrie des sédiments : état actuel (2008-2009) et évolution à long terme (1988-2009)**

Deux méthodologies ont été utilisées dans le cadre des missions COLMATAGE pour l'étude de la granulométrie des sédiments (benne Van Veen et tamisage, benne Shipeck et microgranulométrie Laser). Les cartes de distribution des différentes classes granulométriques présentées ici sont les résultats des prélèvements réalisés à la benne Van Veen. Afin de compléter la description des fonds sédimentaires du système "baie de Seine Orientale – embouchure" et de mieux comprendre sa structuration, une étude a été réalisée plus spécifiquement sur la base des photographies de sédiments prises pour chaque échantillon prélevé lors des campagnes communes 2008-2009. L'accent a été mis sur la notion de texture sédimentaire et un codage des informations apportées par chaque image afin de définir les différents faciès et les patrons de distribution des sédiments dans le secteur. Ce travail découle de plusieurs constats et interrogations :

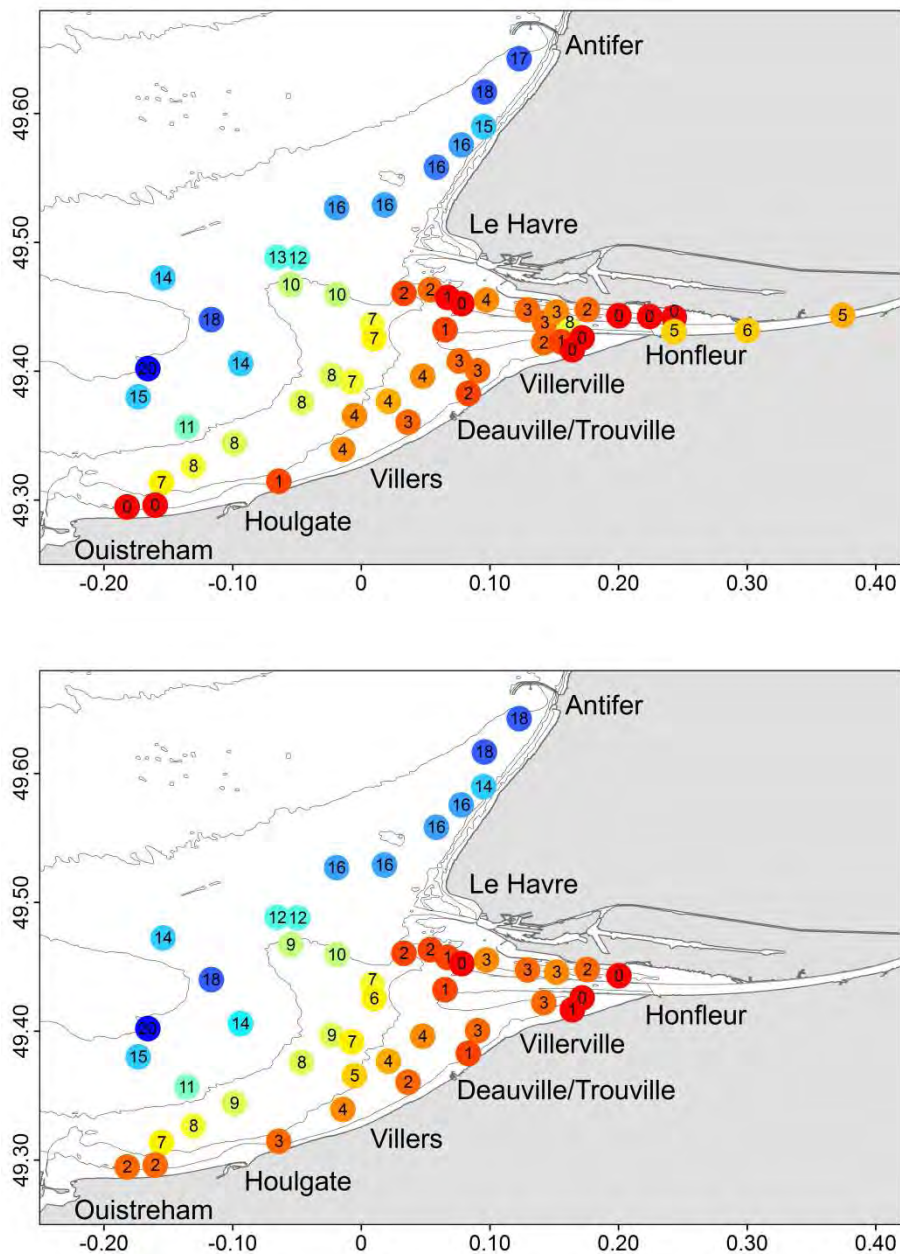
- Tout d'abord, dans un contexte de recherche pluridisciplinaire ayant pour but la compréhension des relations entre la distribution de la faune et celle des sédiments, la question de la représentativité de la caractérisation des faciès sédimentaires de chaque station sur la base du seul réplikat supplémentaire dédié à l'analyse granulométrique s'est rapidement posée. Les campagnes de prélèvement en mer ont permis de se rendre compte de la grande hétérogénéité parfois rencontrée dans certaines zones prospectées (Figure 58). Au sein même d'une station, une grande hétérogénéité a pu être constatée entre les différents réplikats échantillonnés. Cette hétérogénéité est liée à la fois à la nature (granulométrie des sédiments) et à la texture (agencement des différentes fractions granulométriques) des sédiments. La question de cette représentativité se serait moins posée si on ne devait pas tenir compte de la

dérive du bateau au cours de l'échantillonnage. En effet, la distance maximale observée entre le premier répliat (VV1) et les cinq autres prélèvements d'une station donnée varie entre 13 m et 376 m, considérant l'échantillonnage en 2008, et entre 0 m et 316 m, considérant l'échantillonnage en 2009.

- D'autre part, il a également été constaté que les sédiments, au sein même d'un prélèvement pouvaient être agencés de plusieurs manières. Certains prélèvements montraient par exemple à la fois des fractions sableuses et vaseuses plus ou moins bien mélangées.
- Caractériser les échantillons de sédiments en mettant l'accent sur la texture sédimentaire permet également de différencier les différents types de vases que l'on peut rencontrer au sein de ce système. En effet, une analyse granulométrique seule ne suffit pas à connaître la texture de cette vase qui peut prendre plusieurs formes : vase fluide, galets mous, vase compacte ou encore vase en mélange d'autres fractions granulométriques. Dans un contexte où, dans les systèmes côtiers estuariens, de nombreuses études tentent de mettre en avant les réponses de la faune aux phénomènes d'envasement, il semblait important ici de mieux définir la texture de ces vases. En effet, la macrofaune benthique vivant sur ces fonds sera, dans sa composition, impactée par ces différentes configurations et textures sédimentaires, en fonction de sa sensibilité ou de sa tolérance liée à son mode de vie.
- Enfin, il fallait garder à l'esprit, dans la démarche de caractérisation des fonds sédimentaires, les fortes contraintes anthropiques et hydrodynamiques caractérisant ce système complexe. Les informations issues de l'analyse de la texture sédimentaire couplées aux informations granulométriques de base permettent ainsi d'aborder de façon originale la compréhension de sa typologie et de son fonctionnement. Les informations ont donc été codées de telle manière que les différentes caractéristiques sédimentaires prises en compte puissent apporter des informations pouvant aider à comprendre la dynamique et l'origine de la structuration du compartiment benthique (macrofaune et sédiments).

Les différents résultats obtenus ont permis d'établir une synthèse de l'organisation des sédiments intégrant, dans la mesure du possible et en fonction des connaissances déjà acquises, les contraintes hydrodynamiques et anthropiques en tant que facteurs de leur structuration.

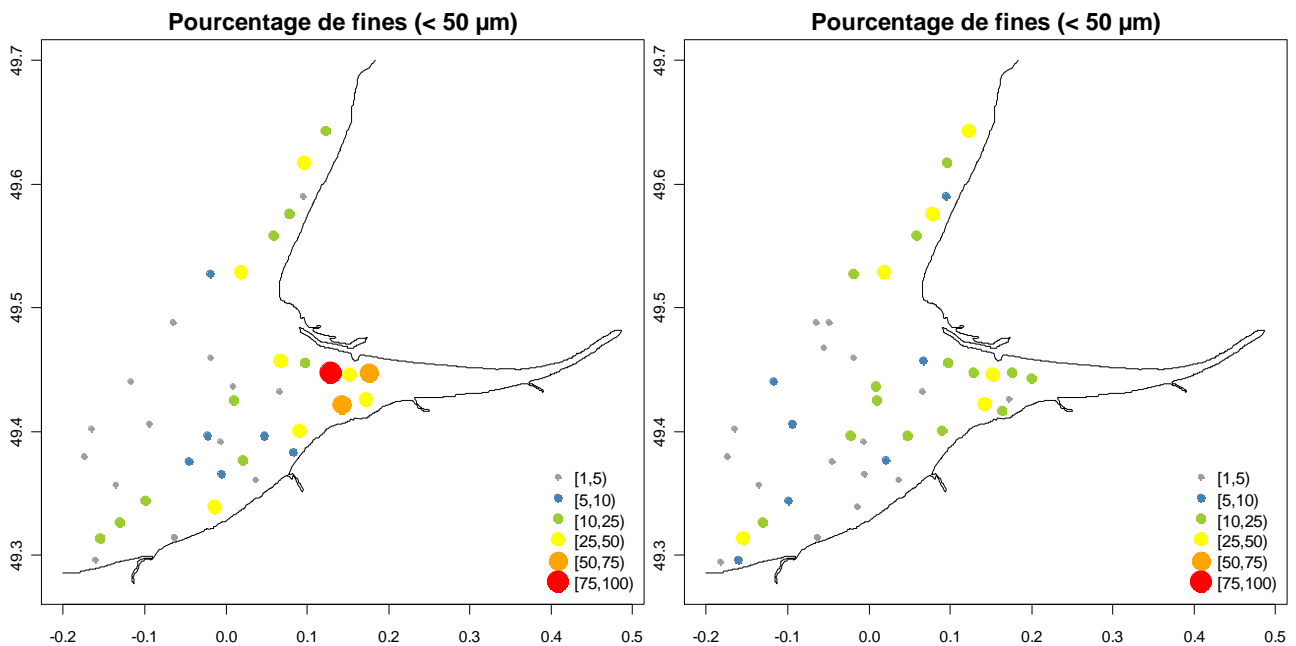




**Figure 52.** Cartes de la bathymétrie en baie de Seine Orientale à partir des données des campagnes automnales COLMATAGE 2008 (haut) et 2009 (bas). Les valeurs correspondent aux profondeurs lues au sondeur et corrigées de la marée. En fond de carte figure la bathymétrie du SHOM 1997.

#### *Situation actuelle de la distribution des fines*

Les cartes de distribution des fines pour les campagnes 2008 et 2009 ont été réalisées en prenant en considération les particules de taille inférieure à 50  $\mu\text{m}$  (Figure 53).



**Figure 53.** Distribution spatiale des particules fines ( $< 50 \mu\text{m}$ ) dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite). Les classes sont exprimées en pourcentage.

Pour l'année 2008, les plus forts pourcentages de fines dans les sédiments (entre 50 et 100 %) sont rencontrés au sein de quatre stations réparties en fond d'estuaire dans les Fosses Nord et Sud à des profondeurs comprises entre 1 et 3 m. Des valeurs intermédiaires (entre 10 et 50 %) sont trouvées à l'embouchure à des profondeurs comprises entre 0 et 4 m puis à l'embouchure, le long des côtes du Pays de Caux et le long des côtes du pays d'Auge entre Deauville et Ouistreham à des profondeurs comprises entre 4 et 10 m. Les stations peu envasées (entre 0 et 5 %) sont situées principalement au large dans les fonds de plus de 10 m, le long de la côte du Pays d'Auge à des profondeurs inférieures à 3 m et dans la continuité du chenal de navigation et de la Fosse Nord à des profondeurs inférieures à 2 m.

Pour l'année 2009, les pourcentages de fines dans les sédiments ne sont plus aussi élevés. A l'embouchure interne, les stations sont caractérisées par des valeurs intermédiaires (entre 10 et 50 %) tout comme celles situées à l'embouchure externe, le long des côtes du Pays de Caux et, dans une moindre mesure qu'en 2008, le long des côtes du Pays d'Auge. En effet, si en 2008 les vases sont plus largement réparties entre Ouistreham et Deauville, en 2009 une zone centrale se distingue et comprend des stations peu ou pas envasées. Dans les fonds supérieurs à 10 m, au large, les sédiments demeurent peu ou pas envasés (0 à 5 %), excepté pour deux stations dont le pourcentage de fines dans les sédiments est compris entre 5 et 10 %.

Dans l'ensemble, les vases sont pour les deux années distribuées principalement en fond d'estuaire dans les deux fosses Nord et Sud, à l'embouchure, le long des côtes du Pays de Caux et le long des côtes du Pays d'Auge. Ce schéma de distribution est conforme à celui décrit par Lesourd (2000), et au résultat de la modélisation des zones préférentielles de dépôts de particules fines liés aux apports de la Seine effectuée par Cugier (1999). Les plus fortes variabilités inter-annuelles observées concernent l'embouchure amont et dans une moindre mesure, la baie de Seine Sud-orientale en face de Villers sur mer.

*Situation actuelle de la distribution spatiale des sables fins : campagnes COLMATAGE*

Les cartes de distribution des sables fins dans le secteur pour les campagnes 2008 et 2009 ont été réalisées en prenant en considération les particules comprises entre 50 et 200  $\mu\text{m}$  (Figure 54).

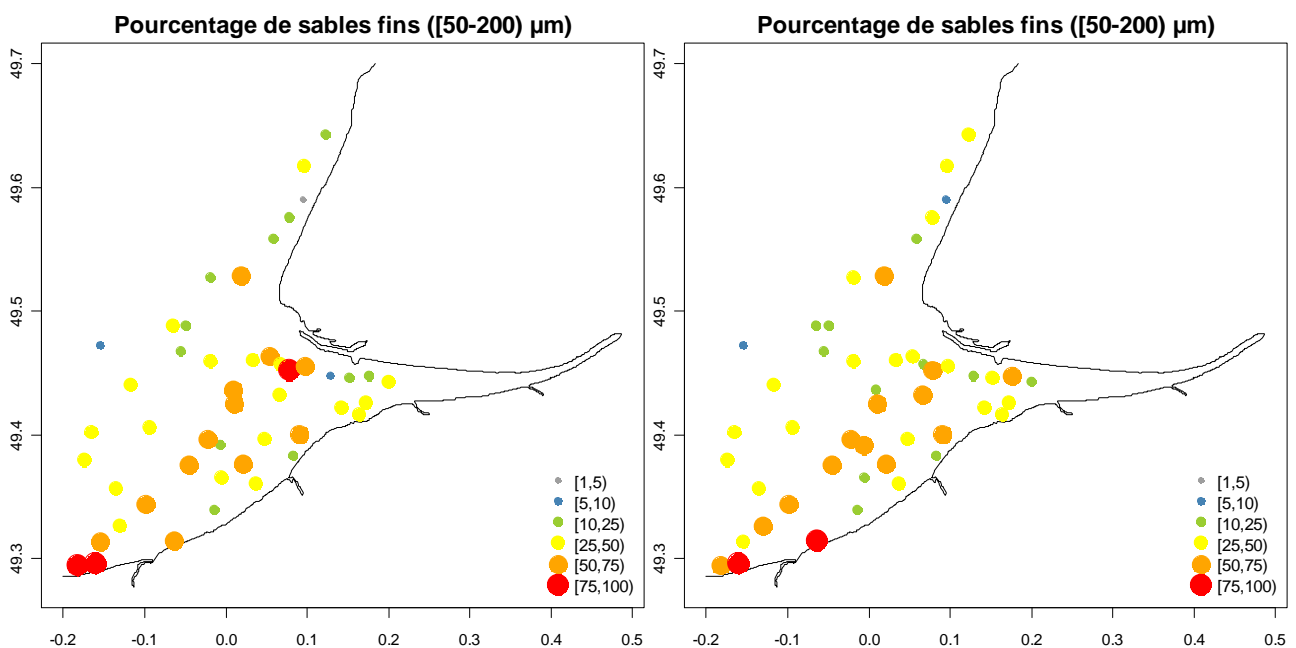


Figure 54. Distribution spatiale des sables fins ([50–200] $\mu\text{m}$ ) dans les fonds subtidiaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite). Les classes sont exprimées en pourcentage.

Dans l'ensemble, une grande stabilité inter-annuelle 2008-2009 de la distribution des sables fins peut être constatée. Les stations caractérisées par les plus forts pourcentages de cette classe (entre 75 et 100 %) sont situées sur des petits fonds compris entre 0 et 3 m. L'une d'entre elle, échantillonnée en 2008 est localisée au niveau de la zone de dépôts de dragage du

Kannick et les autres, échantillonnées en 2008 et en 2009, se situent au niveau des plages le long des côtes du Pays d'Auge. Les teneurs en sables fins dans les sédiments sont importantes (entre 51 et 75 %) le long d'un axe entre Ouistreham et Le Havre sur des fonds entre 5 et 10 m. Les stations comportant entre 25 et 50 % de sables fins ceignent cette première zone et sont donc bien réparties dans les fonds subtidiaux de la baie de Seine Orientale sur des fonds variant de 3 à 20 m. Les secteurs les moins riches en sables fins (entre 5 et 25 %) pour les deux années sont la Fosse Nord, quelques stations plus au large dans l'axe du chenal de navigation et dans une zone en face de Deauville. Le long des côtes entre Le Havre et Antifer et en Fosse Nord, les stations apparaissent légèrement plus riches en sables fins en 2009 qu'en 2008. Dans le prolongement du chenal Nord, à la sortie de la Fosse Nord, les fonds sont sensiblement plus riches en sable fins qu'en 2009.

### *Texture sédimentaire*

Dans cette démarche, ont été comparés, les histogrammes et les courbes cumulées des pourcentages pondéraux des différentes fractions granulométriques des stations visitées en 2008, avec les photographies des sédiments correspondantes et les courbes des pourcentages cumulés issues des résultats de l'analyse Laser. Plusieurs cas de figures sont observés.

### *Cas où aucune différence n'est décelable entre les deux approches*

Environ, la moitié des stations étudiées présentent des résultats similaires entre les deux méthodologies. Elles concernent en majorité des sédiments essentiellement composés de sables moyens à fins.

### *Cas où des différences s'observent au sein des fractions sableuses*

Cela concerne un ensemble d'une dizaine de stations et les différences sont essentiellement dues à un décalage vers les fractions de sables plus grossiers de l'une à l'autre des courbes. Ce décalage n'est pas attribuable spécifiquement à l'une ou l'autre des méthodologies d'échantillonnage puisqu'il concerne aussi bien les courbes issues des prélèvements réalisés à la benne Shipeck qu'à la benne Van Veen. L'examen des photographies montre que ces cas concernent essentiellement des stations où une fraction de sables grossiers est présente.

*Cas où des différences s'observent sur les pourcentages de vase*

Le point de départ des deux courbes donne une information sur les teneurs en vases identifiées par les deux méthodologies. Les différences observées sont liées, au regard de l'examen photographique, à plusieurs raisons. Tout d'abord certaines de ces stations sont caractérisées majoritairement par des sables homogènes. Cependant, on observe qu'en surface, il peut y transiter des vases sous forme de vases fluides ou encore sous forme de galets mous. La benne Shipeck échantillonnant plus particulièrement les sédiments superficiels, c'est elle qui, dans la majorité de ces cas, mesure des teneurs en vases plus élevées. D'autres configurations sédimentaires peuvent aboutir à un résultat similaire, c'est notamment le cas de stations caractérisées par un mélange sablo-vaseux non homogène. Les sédiments sableux relativement propres se répartissent probablement en surface ainsi que parfois autour de blocs de mélanges sablo-vaseux cohésifs. Il est fort probable que les différences observées puissent être imputées aux sous-échantillonnages réalisés dans ces prélèvements pour analyse granulométrique. Un autre cas concerne les stations pour lesquelles une grande hétérogénéité entre répliquats existe. Le dernier cas rencontré, qui engendre de grandes différences dans les pourcentages de vases obtenus, concerne un faciès sédimentaire particulier rencontré essentiellement à l'embouchure dans les fosses Nord et Sud. Les sédiments sont sous forme de vase noire compacte. Fonds anciens d'une dizaine d'années environ, ils sont classés "fonds durs à vase". Il peut transiter sur ces fonds des matériaux de nature variée allant des vases aux sables grossiers avec tous les mélanges possibles. Ces vases sont souvent en cours de démantèlement et la couche de surface, quand elle est présente, peut être d'épaisseur variable et en mélange avec des blocs ou galets de vases détachés. Cette hétérogénéité peut être appréciée à la station 42 (Figure 52).

***Principe du codage effectué sur les photographies des prélèvements***

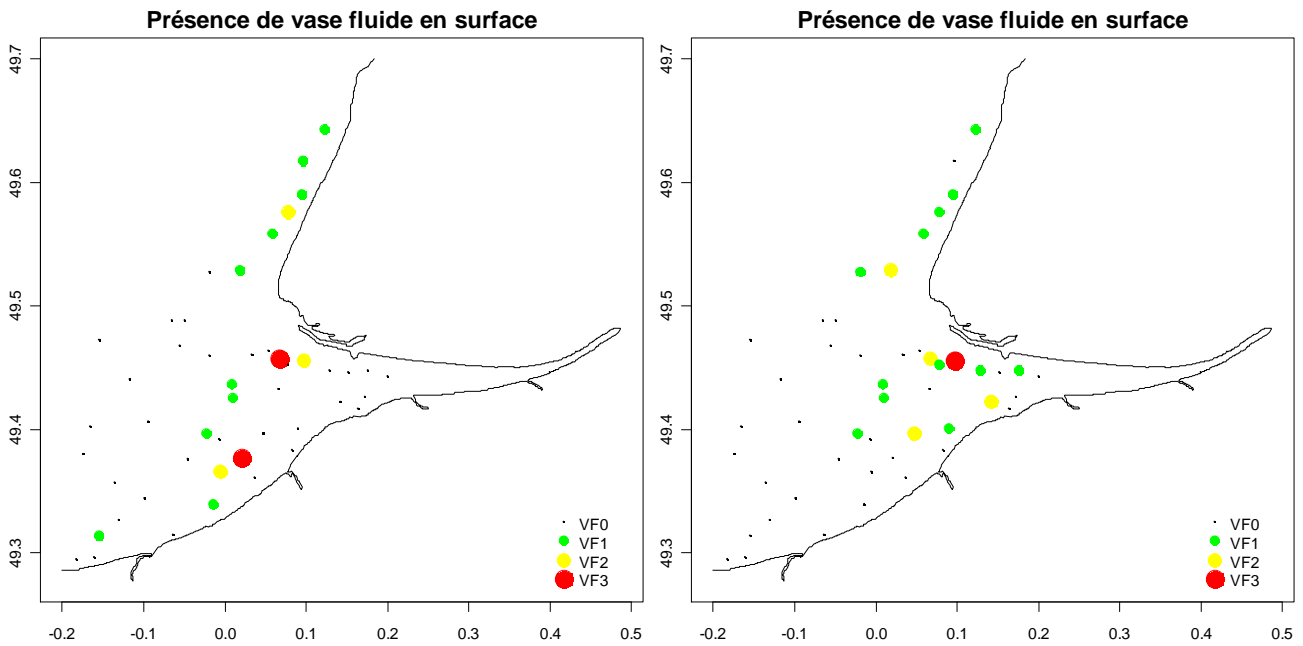
Il a été choisi, pour faciliter les comparaisons, de caractériser les stations communes aux années 2008 et 2009 à partir de la description des photographies des sédiments prises pour chaque échantillon prélevé à la benne Shipeck (seul réplikat) et à la benne Van Veen (six répliquats). Après avoir passé en revue une première fois l'ensemble des images disponibles et compte tenu des résultats de la comparaison des distributions granulométriques issues des deux méthodologies vues précédemment, il semble pertinent de prendre en compte : 1) la présence de vase fluide en surface ; 2) la présence de galets mous en surface ; 3) la présence

d'une stratification ; 4) l'hétérogénéité entre les réplicats ; 5) la notion de cohésion sédimentaire et la notion de remaniement sédimentaire. Ces variables comportent chacune plusieurs modalités. Il est à noter que l'attribution d'une modalité est parfois rendue délicate compte tenu de l'hétérogénéité rencontrée entre les réplicats composant certaines stations. Cependant le choix de l'attribution d'une modalité donnée à une station hétérogène s'est effectuée, en la considérant dans son ensemble et en choisissant celle qui la représentait le mieux après visualisation de tous les prélèvements. Ainsi, la présence d'une caractéristique sédimentaire sur un seul réplikat a parfois suffi à attribuer à la station la modalité correspondante.

#### Présence de vase fluide en surface

La présence de vase fluide en surface a été quantifiée en trois classes : "VF0" pour "absence", "VF1" pour "faible quantité", "VF2" pour "quantité moyenne", et "VF3" pour "grande quantité". Ce type de vase se reconnaît assez facilement par sa couleur claire et sa texture crémeuse et provient essentiellement du stock sédimentaire vaseux situé à l'embouchure. La vase fluide ou crème de vase (localement appelée vapie) est associée au bouchon vaseux et sa présence témoigne des rejets de l'estuaire, notamment en période de fort débit fluvial. Même si la benne Van Veen conserve moins bien la stratification sédimentaire, sa présence dans l'échantillon peut être observée. Cette vase est facilement remobilisable par les agents hydrodynamiques et peut prendre la forme de petits patches ou de placages plus ou moins importants. Elles sont présentes à l'embouchure et le long des côtes du Pays de Caux pour les deux années échantillonnées et uniquement le long des côtes du Pays d'Auge en 2008 (Figure 55).

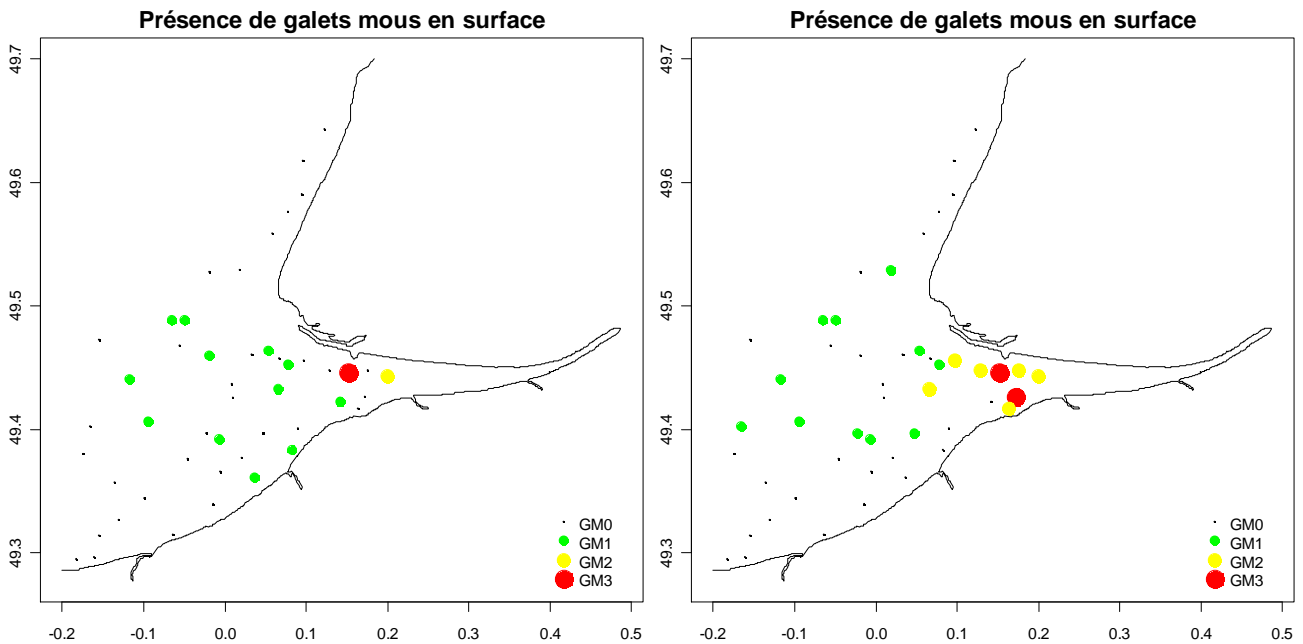




**Figure 55.** Distribution spatiale de la présence de vase fluide en surface des sédiments dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite).

#### Présence de galets mous en surface

La présence de galets mous en surface a été quantifiée en trois classes : "G0" pour "absence", "G1" pour "faible quantité", "G2" pour "quantité moyenne", et "G3" pour "grande quantité". Ces galets mous proviennent de l'érosion des fonds de vase compacte. Ils ressemblent, comme le nom l'évoque, à des galets qui sont sous forme ronde et plate quand ils sont bien érodés par les agents hydrodynamiques. Ils peuvent aussi se rencontrer sous des formes plus anguleuses quand ils ont été fraîchement détachés d'un socle vaseux compact en cours de démantèlement. Ils sont ainsi les témoins de l'"autophagie" d'un système déstabilisé et/ou en cours de restructuration. C'est notamment le cas dans les chenaux de navigation au nord et au sud de l'embouchure interne où nous les retrouvons en plus forte quantité. Quand leur présence est détectée dans les stations plus au large, ceci est à relier à leur déplacement par les agents hydrodynamiques. Leur couleur peut varier et prendre une teinte claire ou foncée selon que le socle de vase compacte dont ils sont issus est de type (respectivement) vase holocène grise ou vase noire dont l'origine est plus récente. Alors que les fonds de vase noire compacte sont fréquemment observés à l'embouchure dans les Fosses Nord et Sud, de la vase grise compacte holocène affleure parfois en baie de Seine Sud-orientale (Figure 56).



**Figure 56.** Distribution spatiale de la présence de galets mous en surface des sédiments dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite).

### Notion de remaniement sédimentaire

Cette variable comprend quatre modalités qui représentent les structures sédimentaires majeures pouvant être identifiées à partir des photographies des sédiments. C'est au travers de ces modalités que peut être vue la structuration majeure des fonds sédimentaires du secteur étudié. On distingue ainsi les sédiments de types :

1) "REmelSV" pour "mélange sablo-vaseux". Cette modalité a été attribuée à des stations pour lesquelles on distingue aisément une structure sablo-vaseuse relativement compacte. Il est à noter qu'elle est totalement indépendante des autres formes de vases rencontrées comme les vases fluides et galets mous qui sont mobiles en surface. Il est donc possible de rencontrer des stations caractérisées à la fois par ce mélange sablo-vaseux et par la présence de vase fluide comme à la station 2 (Figure 52).

2) "REdem" pour "démantèlement". Cette modalité est attribuée à des stations dont les sédiments sont des vases noires compactes anciennes pouvant être en cours de démantèlement. La notion de démantèlement est visible par la présence de cette vase noire compacte sous forme de blocs difformes. Il est à noter que cette texture est également à dissocier des galets mous présents en surface, dont la forme lisse et arrondie témoigne d'une usure issue de leur déplacement par les agents hydrodynamiques. S'ils sont présents au sein

d'un échantillon, ils peuvent provenir d'une autre zone et ne sont donc pas caractéristiques du démantèlement de la station étudiée.

3) "REscq" pour "sables coquilliers", ces dépôts comportent une grande proportion de débris coquilliers (coquilles entières et brisées), jusqu'à 90 % de la masse de l'échantillon.

4) "Renon" pour "non remanié" ne comportant pas de texture particulière.

### Notion de cohésion sédimentaire

Cette variable doit être vue comme une description complémentaire à la notion de remaniement sédimentaire. Elle est composée de deux modalités :

1) "COHoui" pour "cohésif" quand une compaction globale des sédiments est observée.

2) "COHnon" pour "non cohésif" quand les sédiments ne sont pas compactés.

### Variation verticale de faciès

Cette variable peut également être appréhendée comme une description complémentaire à la notion de remaniement sédimentaire. Elle se décline aussi en deux modalités :

(ii) "STnon" quand aucune stratification n'est visible ;

(i) "SToui" pour "stratification" identifiée au sein d'une station.

La modalité "stratification" a été attribuée lorsqu'elle était identifiable, en prenant en compte l'ensemble des répliquats pour une station donnée. Elle reflète la notion de transit superficiel de matériaux sableux à vaseux sur des fonds qui peuvent être caractérisés par des sables (sables grossiers), des mélanges sablo-vaseux cohésifs ou non ou encore des fonds durs à vase.

### Hétérogénéité entre répliquats (Figure 57)

La notion d'hétérogénéité a été décomposée en quatre classes :

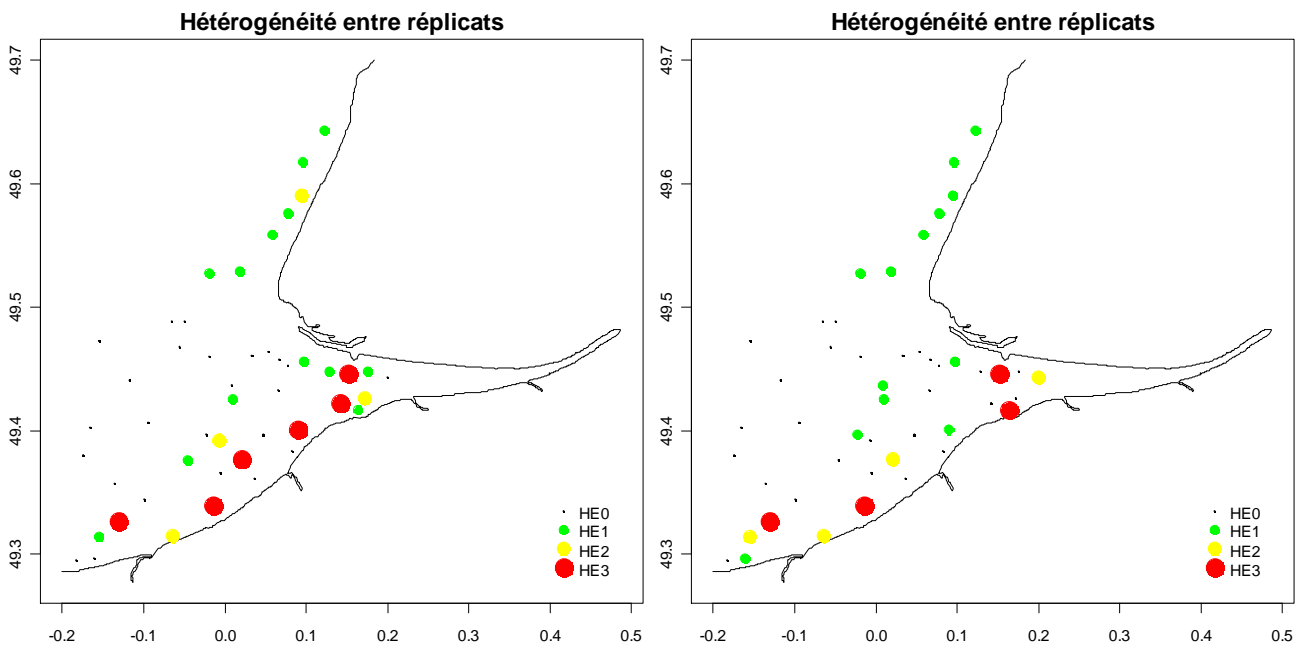
1) "HE0" pour "hétérogénéité nulle".

2) "HE1" pour "hétérogénéité faible" a été définie pour des stations qui montraient par exemple des sédiments hétérogènes au sein d'un prélèvement mais dont cette hétérogénéité était visible relativement fidèlement pour chaque réplikat.

3) "HE2" pour "hétérogénéité moyenne" concerne des stations comprenant un réplikat ou deux différents des autres, ou encore dans des cas où la benne Van Veen avait mal fonctionné sur un ou deux répliquats. D'autres cas peuvent être classés dans cette modalité quand les fonds

présentent une stratification verticale de sédiments de types différents avec une couverture de surface qui peut être plus ou moins importante. Il est à noter que si la benne Van Veen fonctionne parfois mal sur ces fonds, cela peut être attribué à cette notion de stratification.

5) "HE3" pour "hétérogénéité forte" a été attribuée à quelques stations montrant des réplicats dont les sédiments pouvaient être complètement différents



**Figure 57.** Distribution spatiale de la notion d'hétérogénéité entre réplicats dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite).

#### 4.9.2. Définition des faciès sédimentaires, différents points de vue : état actuel (COLMATAGE 2008-2009)

Au regard des différentes distributions observées, il apparaît délicat de se représenter une structuration claire du compartiment sédimentaire dans le secteur prospecté.

#### *Méthodes de classification*

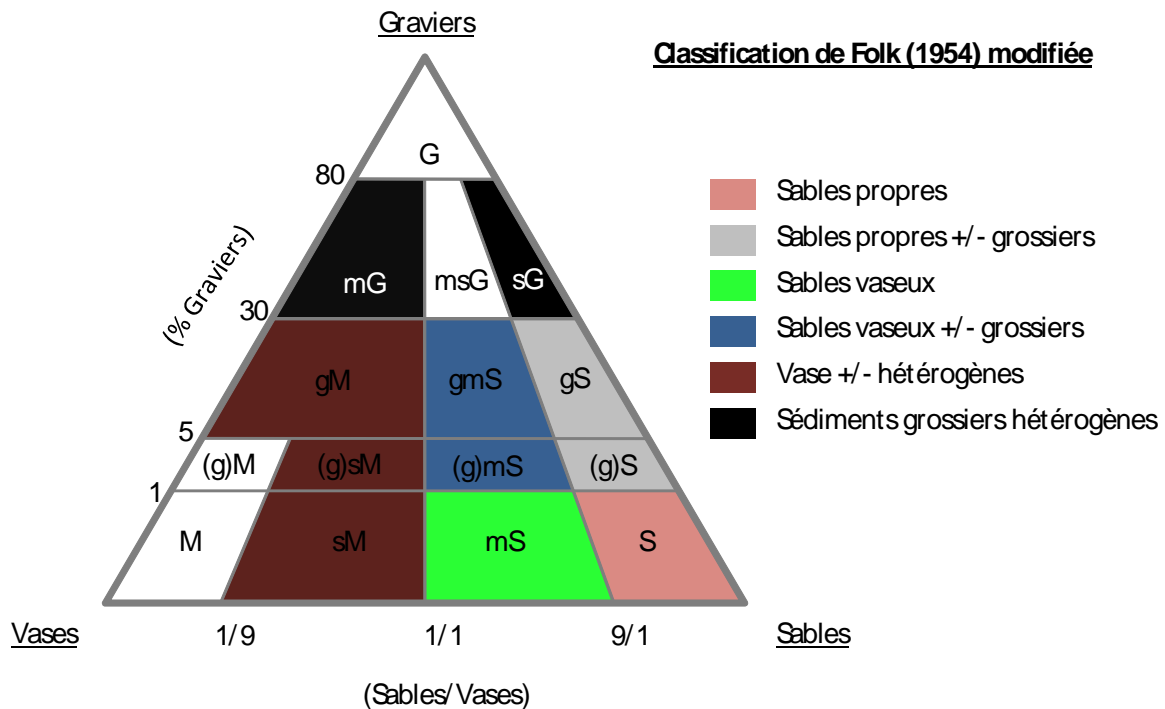
La définition de types sédimentaires permet de synthétiser l'information. Plusieurs classifications existent, parmi lesquelles celle de Folk bien connue des benthologues et celle de Larssonneur modifiée (Lesourd, 2000) largement utilisée dans la caractérisation des

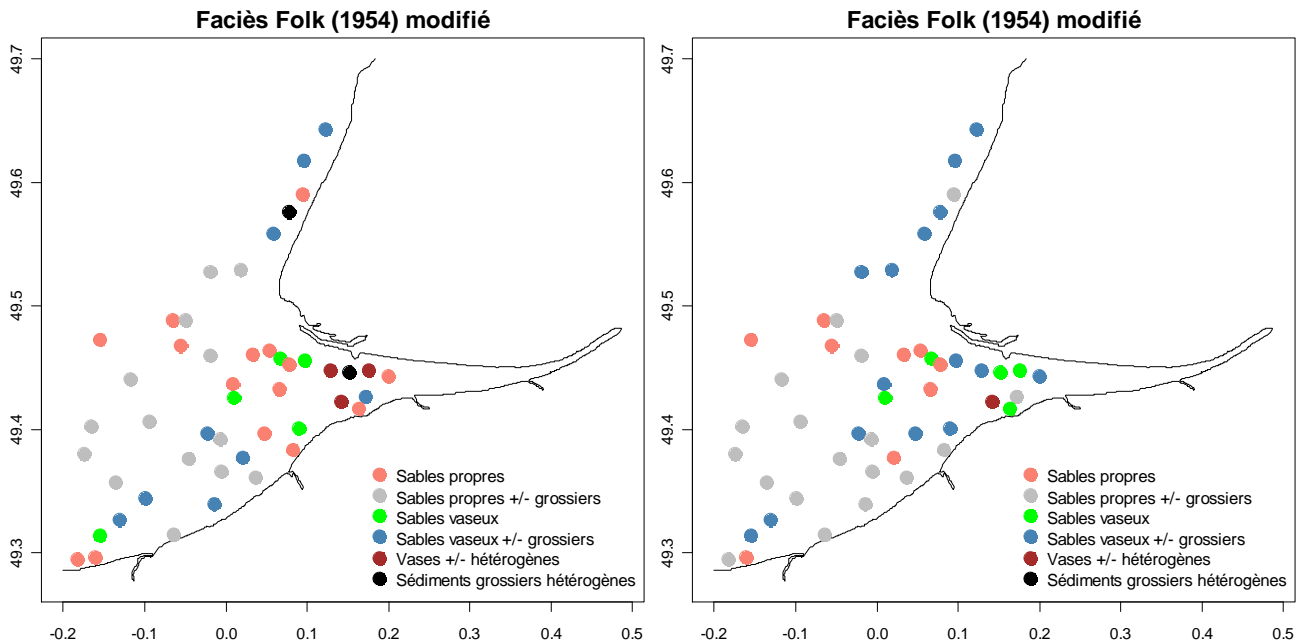
sédiments superficiels en baie de Seine Orientale et à l'embouchure, comme ailleurs en Manche.

Diagramme de Folk (1954) modifié et distribution spatiale des géo-faciès identifiés

La classification sédimentaire de Folk (1954) définit, dans sa version originale, 15 classes sédimentaires réparties au sein d'un diagramme triangulaire utilisant le pourcentage de graviers (diamètre des grains entre 2000 et 5000  $\mu\text{m}$ ) et le ratio du pourcentage de sables (diamètre des grains entre 63  $\mu\text{m}$  et 2000  $\mu\text{m}$ ) sur le pourcentage de vases (diamètre des grains inférieurs à 63  $\mu\text{m}$ ).

Il a été choisi de simplifier cette classification. En effet, les stations échantillonnées en baie de Seine en 2008-2009 sont bien réparties au sein de 11 classes, sur les 15 définies par ce diagramme, et une première cartographie de ces différentes classes montrait des résultats difficilement interprétables. La Figure 58 illustre les modifications apportées par regroupement de classes et la dénomination choisie pour définir ces nouveaux groupements.





**Figure 58.** Diagramme de Folk (1954) modifié (haut), les cases non colorées de ce diagramme correspondent aux géo-faciès non rencontrés en 2008-2009. Distribution spatiale des six géo-faciès sédimentaires identifiés selon cette classification dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (bas et gauche) et en septembre 2009 (bas et droite). La notion de "propre" est à relier à la quasi absence de vases, la notion de "grossiers" est à relier à la présence de grains supérieurs à 2 mm qu'ils soient des graviers ou des coquilles, la notion d' "hétérogène" fait référence à la présence de différentes fractions granulométriques.

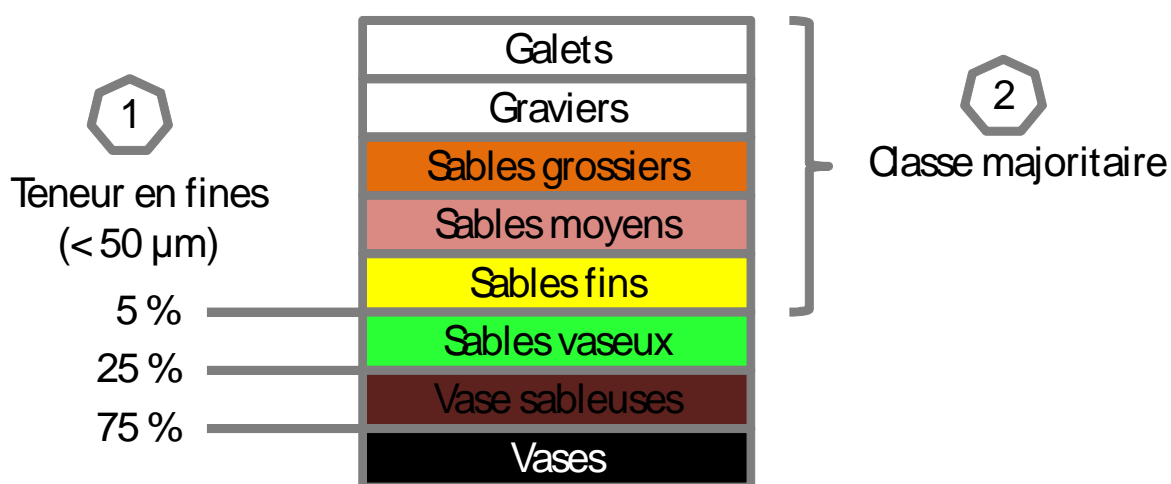
Cette classification donnant beaucoup d'importance aux graviers a été simplifiée en conséquence, redonnant ainsi plus de poids au gradient sables-vases. Des regroupements ont été effectués pour ne pas se retrouver avec des classes trop faiblement représentées. Sur cette Figure sont également représentées les cartes de distribution spatiale de ces nouveaux types sédimentaires.

Six faciès ont ainsi été reconnus en baie de Seine et à l'embouchure au sens de la classification de Folk (1954) modifiée. Le terme "grossier" fait ici référence à des graviers ou coquilles dont le diamètre est supérieur à 2 mm (Figure 59). Le terme "propre" est relatif à des sédiments très peu ou pas envasés. Malgré une simplification de la classification initiale de Folk, une grande diversité spatiale des géo-faciès est rencontrée. L'examen cartographique montre dans son ensemble des sédiments sableux propres au large, puis des sédiments sablo-vaseux à vaseux à l'abord des côtes. Cette distribution s'accompagne de sédiments à caractère plus grossier en baie de Seine Nord et Sud-orientale puis à l'embouchure. La comparaison des

deux années ne révèle pas de changements majeurs, mais il y a en 2009 une baie de Seine Sud-orientale moins envasée et une embouchure où les sables vaseux semblent dominants sur les vases.

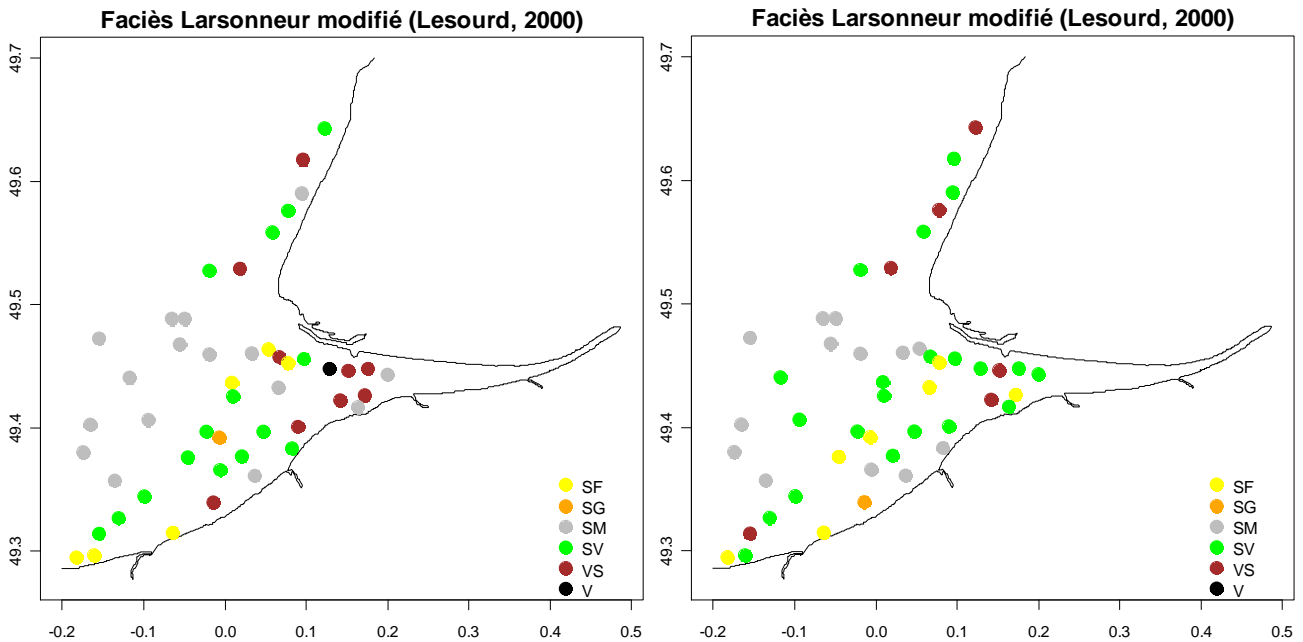
Classification de Larssonneur modifiée (Lesourd, 2000) et distribution spatiale des géo-faciès identifiés

La classification sédimentaire de Larssonneur modifiée (Lesourd 2000), définit huit classes sédimentaires. Elle définit dans un premier temps les vases, vases sableuses et sables vaseux en fonction de la teneur en fines (diamètre des grains inférieurs à 50  $\mu\text{m}$ ) dans les sédiments. Dans un deuxième temps, les autres types sédimentaires se définissent en fonction de la classe majoritaire. La Figure 60 illustre cette classification ainsi que les cartes de distribution spatiale de ces types sédimentaires.



**Figure 60.** Classification de Larssonneur modifiée Lesourd.





**Figure 61.** Classification de Larsonneur modifiée (Lesourd, 2000) (haut), les cases non colorées de ce diagramme correspondent aux géo-faciès non rencontrés en 2008-2009.

Distribution spatiale des faciès sédimentaires selon cette classification dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (bas et gauche) et en septembre 2009 (bas et droite).

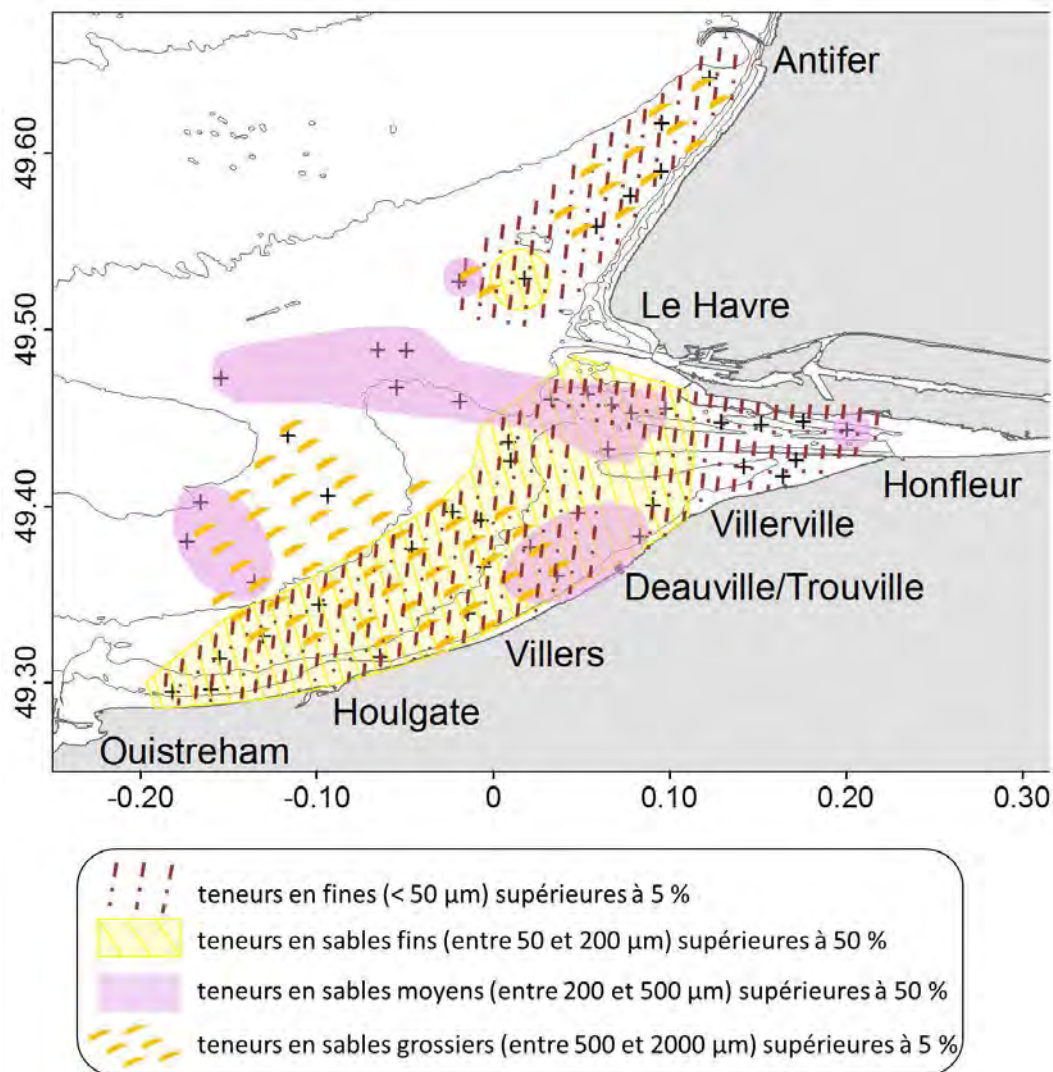
Cette classification permettant de caractériser au mieux la teneur en vase dans les sédiments, les mélanges sablo-vaseux apparaissent plus largement répartis que sur l'image donnée par la classification de Folk (1954) modifiée. Cependant, la même tendance inter-annuelle (2008-2009) est observée avec quelques stations moins envasées en baie de Seine Sud-orientale, et un mélange sablo-vaseux remplaçant les vases à l'embouchure (Figure 61).

#### 4.9.3. Proposition de synthèse de l'organisation sédimentaire dans le système "baie de Seine Orientale – embouchure"

*Organisation actuelle (2008-2009) des sédiments et problématique de la stratégie de leur échantillonnage au sein du système " baie de Seine Orientale – embouchure "*

Si l'on considère les résultats obtenus dans leur ensemble, tous font apparaître un gradient allant des sables propres du large vers les vases à l'embouchure. Ce gradient est cohérent avec le constat général (à l'échelle du système "baie de Seine Orientale – embouchure") d'un affinement sédimentaire en relation avec une diminution de l'intensité des courants de marée

du large vers les milieux côtiers moins profonds (Avoine, 1981 ; Lesourd, 2000). Ils ont néanmoins confirmé que ce gradient n'est pas aussi net. Si l'on se réfère aux classifications de Folk (1954) modifiée et de Larssonneur modifiée (Lesourd, 2000), les différences observées sont les plus remarquables en baie de Seine Nord et Sud-orientale ainsi qu'à l'embouchure. Ces différences concernent essentiellement des stations isolées plutôt que des zones spatialement identifiables, et sont à relier aux différents niveaux de coupures des pourcentages de chaque classe sédimentaire. La Figure 62 synthétise la distribution spatiale des différentes fractions granulométriques et illustre bien cette notion d'emboîtement.



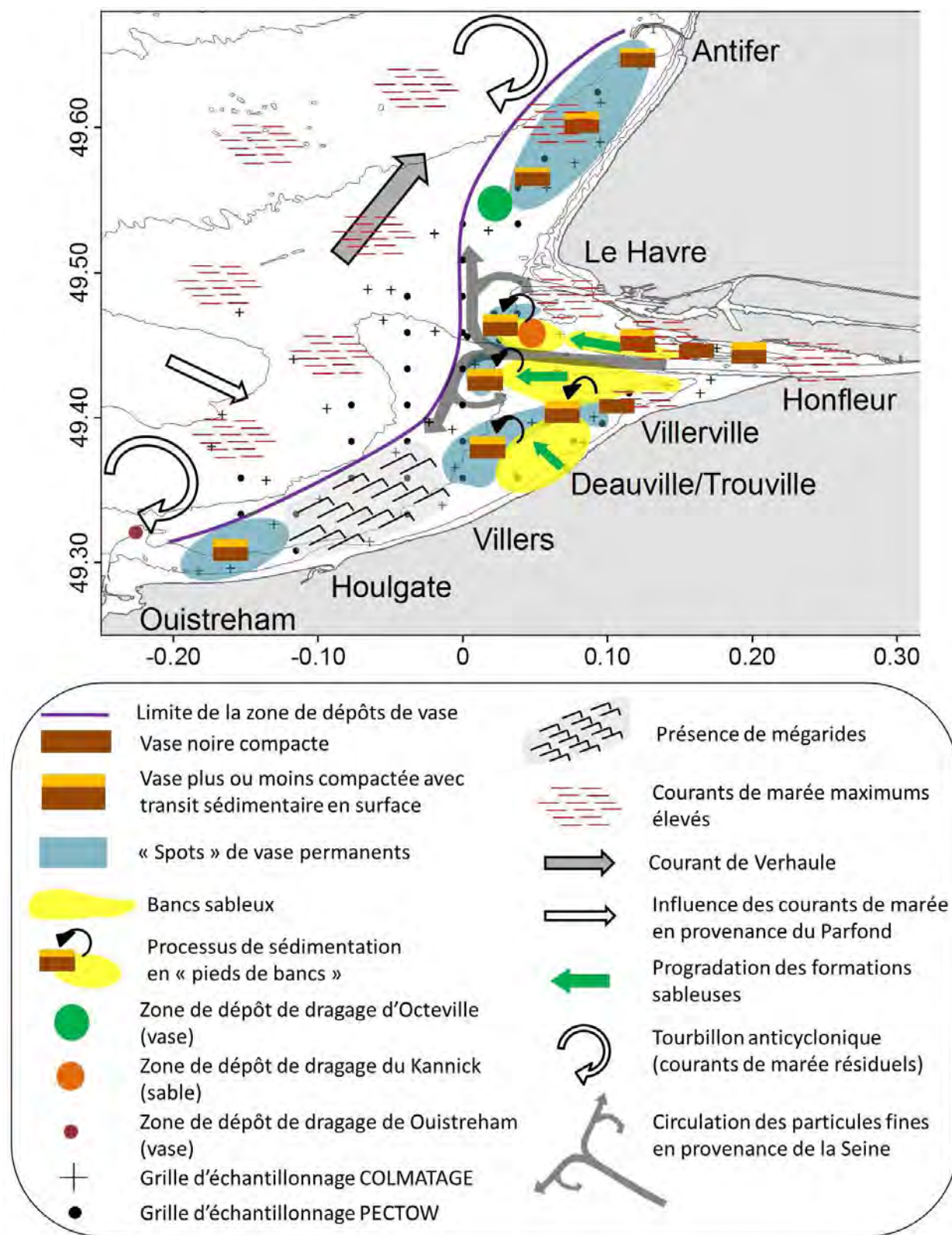
**Figure 62.** Schéma synthétique (COLMATAGE 2008-2009) du recouvrement spatial de quatre des classes granulométriques prises en compte. Les zones représentent les teneurs maximales des différentes classes granulométriques retenues : teneurs en fines ( $< 50 \mu\text{m}$ ) supérieures à 5 %, teneurs en sables fins (entre 50 et  $200 \mu\text{m}$ ) supérieures à 50 %, teneurs en sables moyens (entre 200 et  $500 \mu\text{m}$ ) supérieures à 50 %, teneurs en sables grossiers (entre 500 et  $2000 \mu\text{m}$ ) supérieures à 5 %, teneurs en graviers ( $> 2000 \mu\text{m}$ ) supérieures à 10 %.

L'analyse texturale des sédiments montre, de façon cohérente et complémentaire, que ce gradient s'accompagne d'une complexification de la structure sédimentaire. Une hétérogénéité spatiale verticale est appréciée sur les photographies. La stratification sédimentaire caractérisant les fonds du secteur étudié, à relier à la texture même des sédiments, et dont la variabilité est étroitement liée aux conditions hydrodynamiques, se traduit également par une hétérogénéité horizontale. Cette hétérogénéité avait déjà été mise en évidence lors d'études antérieures s'étant intéressées à des carottages, notamment au niveau de l'embouchure (Lesourd, 2000 ; Janson, 2007) et en baie de Seine Sud-orientale (Avoine, 1981, 1994). L'hétérogénéité qui touche ces fonds ne se répercute pas uniquement à l'échelle de la station échantillonnée, mais elle est également identifiée à l'échelle du prélèvement lui-même. Basée sur l'analyse photographique de tous les échantillons prélevés, cette approche a ainsi permis de dégager une problématique majeure concernant le protocole d'échantillonnage des sédiments, en relation avec cette hétérogénéité sédimentaire pouvant s'exprimer à des échelles réduites (réplicat, station). Cette problématique touche à la fois, la représentativité du seul réplikat sédimentaire mais également le sous-échantillonnage réalisé dans ce prélèvement pour analyse granulométrique. Ainsi, dans les milieux relativement hétérogènes et complexes comme en baie de Seine Sud-orientale ou encore à l'embouchure, le prélèvement supplémentaire dédié à l'analyse granulométrique n'est pas toujours représentatif de l'ensemble des prélèvements dédiés à l'analyse faunistique. De même, ces derniers peuvent être parfois très différents les uns des autres. D'autre part, il n'existe pas de prise en compte de cette hétérogénéité dans la méthode du sous-échantillonnage des sédiments dans un prélèvement. Cela sous-entend la nécessité d'améliorer la stratégie de leur échantillonnage dans les futures campagnes de prospection. Il est actuellement difficile, lorsque l'on a affaire à des données de granulométrie, de faire la distinction entre les différents types de vases, entre les mélanges sablo-vaseux et les vases et/ou les sédiments en transit en surface. Pour exemple, si nous avons pu entrevoir un caractère plus sableux (ou moins envasé) à l'embouchure et en baie de Seine Sud-orientale en 2009 par rapport à l'année 2008 sur la base des données granulométriques, l'analyse texturale montre que c'est plutôt lié à une couverture sableuse mobile plus épaisse en transit sur un mélange sablo-vaseux toujours présent. Cependant, la typologie effectuée dans cette étude ne rend pas forcément bien compte de cette configuration. En effet, les stations caractérisées par un mélange sablo-vaseux non stratifié sont plus nombreuses en 2009. Cela tient essentiellement à la difficulté de classer certaines stations et de quantifier cette couche sédimentaire de surface puisque la benne Van Veen a tendance à moins bien conserver cette stratification. Aussi, lorsque la couche sédimentaire de

surface est plus épaisse, la stratification au sein de l'échantillon est moins bien identifiable en raison de la relativement faible épaisseur de sédiments échantillonnée. Dans ce cas précis la benne Shipeck ne peut être une solution puisqu'elle pénètre encore moins profondément dans les sédiments et seul un carottage aurait probablement mieux rendu compte de cette structuration. Il faut cependant rester prudent compte tenu des deux seules années prospectées ; un plus grand nombre d'images de la situation intégrant une étude des photographies des sédiments ainsi qu'une amélioration du protocole de leur examen pourra permettre de préciser la typologie.

*Synthèse de l'organisation sédimentaire dans le contexte hydrodynamique et anthropique du système, détection des changements à long terme*

Cette synthèse s'accompagne d'un schéma synthétique et simplifié, représentant un point de vue de l'organisation général du compartiment benthique sédimentaire en relation avec son contexte hydrodynamique et anthropique (Figure 63). Il permet de rendre compte de la diversité des situations rencontrées. Les éléments figurants sur ce schéma récapitulatif sont issus des connaissances à la fois antérieures et nouvellement acquises, incluant une notion de variabilité spatio-temporelle s'exprimant à différentes échelles d'observation. Le gradient d'affinement sédimentaire du large vers la côte peut s'accompagner d'une complexification liée à la texture et à la stratification verticale des sédiments. Or, la complexité de l'organisation sédimentaire peut également être mise en relation avec les contraintes hydrodynamiques et anthropiques de ce système. La zone la plus au large, soumise à de forts courants maximums de marée (supérieurs à  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ ), est caractérisée par les sables moyens à grossiers alors que les sables fins envasés sont mieux représentés au niveau de la zone de vitesses de courants maximums de marée intermédiaires (inférieurs à  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ ), en baie de Seine Sud-orientale. Les courants de marée, dans cette zone, ne sembleraient pas suffisants pour empêcher les sédiments fins de s'y déposer. Cependant, cette relation "intensité des courants de marées – distribution des sédiments" est associée à de nombreuses contradictions si l'on considère certaines zones du secteur étudié. Cela concerne plus particulièrement : 1) des zones très localisées en baie de Seine Sud-orientale, 2) la baie de Seine Nord-orientale et 3) l'embouchure.



**Figure 63.** Schéma synthétique et simplifié de l'organisation sédimentaire dans le contexte hydrodynamique et anthropique du système " baie de Seine Orientale - embouchure ".

### *Synthèse sur l'organisation sédimentaire et étude des relations benthos-sédiments*

Le besoin de comprendre et de mieux définir l'organisation sédimentaire repose sur la problématique générale de l'étude des relations 'macrofaune benthique – sédiments' qui ne sont pas clairement établies au sein de ce système estuarien complexe. Au regard des connaissances et des résultats nouvellement acquis, notamment sur l'étude de la texture sédimentaire, il est aisément facile de comprendre la difficulté de mettre en avant ces relations. Selon leur mode de vie, les espèces vont vivre plus ou moins profondément enfouies dans les sédiments ou simplement rester en surface. L'existence ou non d'une stratification sédimentaire, la nature des vases, la texture sédimentaire ou encore la présence d'espèces ingénieuses (comme *Owenia fusiformis*) au sein d'un prélèvement sont autant de facteurs pouvant influencer son degré d'hétérogénéité et donc sa composition faunistique. En termes de stratification, si les sédiments sous-jacents sont de nature et/ou de texture différente que des sédiments se trouvant plus en surface, cela constitue deux habitats sédimentaires différents pour la faune. On peut alors retrouver au sein même d'un réplikat des espèces dont les affinités sédimentaires sont théoriquement différentes. De plus, l'hétérogénéité horizontale qui se fait ressentir entre les réplikats d'une même station peut amener à un résultat similaire. Il est donc délicat d'aborder de façon rigoureuse les relations benthos-sédiments avec la seule considération de sa granulométrie, d'autant plus qu'elle se base sur le prélèvement d'un seul réplikat supplémentaire à ceux réalisés pour analyse faunistique. De plus, il a pu être apprécié l'importance de l'hydrodynamisme sur la distribution, la texture et la dynamique sédimentaire. Ces facteurs doivent être considérés pour comprendre les schémas de structuration de la macrofaune benthique. Ainsi les données de granulométrie sont à prendre avec beaucoup de précautions et des informations complémentaires concernant leur ordonnancement s'avèrent indispensables.

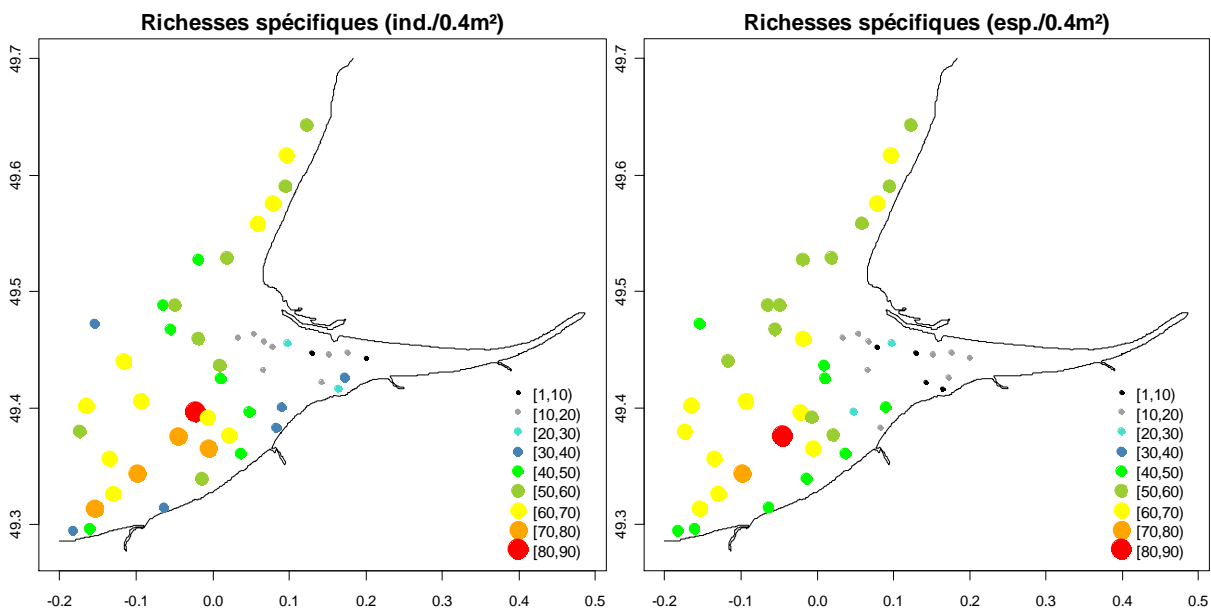
#### 4.9.4. Caractéristiques et organisation de la macrofaune benthique en relation avec son environnement hydro-morpho-sédimentaire complexe

##### *Distribution spatiale des richesses spécifiques (nombre d'espèces par 0.4 m<sup>2</sup> en 2008 et 2009)*

Les valeurs de richesses spécifiques se montrent spatialement et temporellement stables entre les deux années prospectées, ce qui laisse présager une forte structuration de cet indice par les facteurs environnementaux. Les valeurs de richesses spécifiques sont les plus importantes sur les fonds sablo-vaseux de la baie de Seine Sud-orientale (entre 60 et 90 esp. / 0,4 m<sup>2</sup>) dont la



profondeur varie entre 4 et 10 m, puis sur les fonds hétérogènes envasés de la baie de Seine Nord-orientale ainsi qu'au niveau du Parfond (entre 40 et 70 esp. / 0,4 m<sup>2</sup>) sur des fonds de plus de 10 m (Figure 64). Les stations les plus côtières et situées au niveau de l'embouchure interne, sont caractérisées par de plus faibles richesses spécifiques (entre 1 et 40 esp. / 0,4 m<sup>2</sup>), probablement en raison des fortes contraintes hydrodynamiques mais aussi des plus fortes variations de salinité face auxquelles peu d'espèces peuvent survivre. C'est également le cas à l'embouchure externe et au niveau de la zone de dépôt de dragage du Kannick, sur des fonds essentiellement sableux.



**Figure 64.** Distribution spatiale des richesses spécifiques (esp./0.4 m<sup>2</sup>) dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite).

#### *Evolution à long terme des richesses spécifiques : campagnes PECTOW (1988-2006)*

Les années 1988-1996 se distinguent par des richesses spécifiques plus faibles que pour les autres années. En 1991 et en 2006, les "spots" de richesse spécifique sont situés en baie de Seine Sud-orientale ainsi qu'en face du Cap de la Hève, et en 2001, ils sont bien représentés en baie de Seine Sud et Nord-orientale. Nous pouvons remarquer que les stations à l'embouchure externe en face de Deauville ainsi que quelques stations en prolongement de la Fosse Nord, sont chaque année les moins riches en espèces. Si l'on prend en considération les années 2008 et 2009 pour avoir une vision à l'échelle du système "baie de Seine Orientale – embouchure", il existe une structuration spatiale stable et contrastée entre la zone de

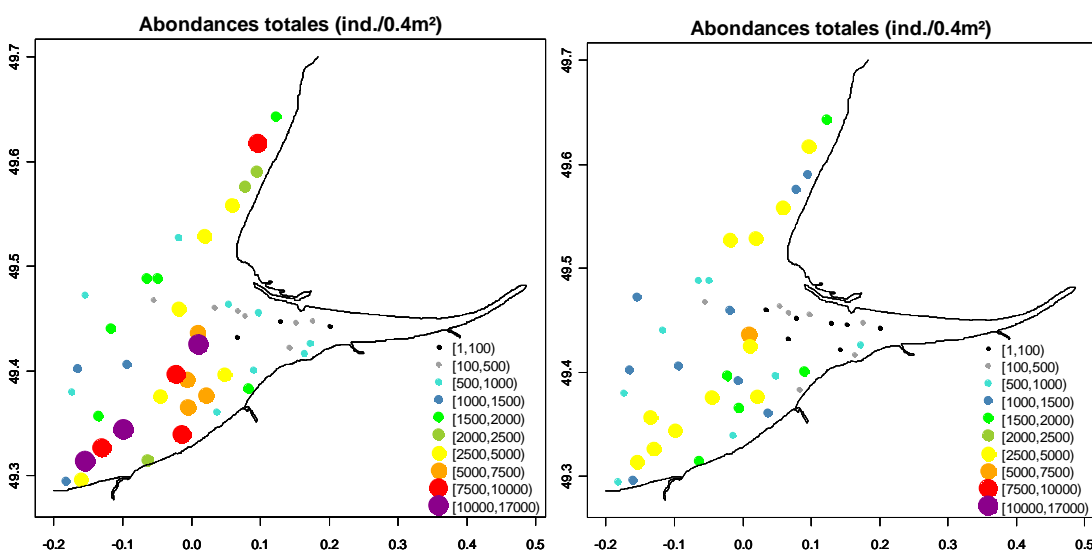


l'embouchure qui présente de faibles richesses spécifiques comparativement au reste du secteur. D'autre part, les plus fortes valeurs de richesse spécifique se distribuent chaque année le long d'une bande littorale entre Ouistreham et Antifer au sein de la communauté à *Abra alba*, avec une plus forte variabilité inter-annuelle face à l'embouchure.

*Distribution spatiale des abondances (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>)*

*Campagnes COLMATAGE (2008-2009)*

Sur la base de l'échantillonnage commun (48 stations), un total de 144135 individus a été comptabilisé pour l'année 2008 et 70941 individus pour l'année 2009. Il est remarquable de constater que les abondances ont diminué de moitié entre les deux années. La comparaison des situations de 2008 et de 2009 (Figure 65) montre néanmoins que la distribution spatiale des valeurs d'abondance est bien conservée d'une année sur l'autre malgré leur forte diminution. Les plus fortes valeurs d'abondance sont rencontrées chaque année à deux stations en embouchure aval en face du banc des Ratelets (entre 5000 et 17000 ind. / 0,4 m<sup>2</sup>), en baie de Seine Sud-orientale sur des sédiments sablo-vaseux en mélange (entre 2500 et 17000 ind. / 0,4 m<sup>2</sup>), puis sur les fonds hétérogènes envasés du la baie de Seine Nord-orientale (entre 1500 et 10000 ind. / 0,4 m<sup>2</sup>). Les zones proches du Parfond et du banc de Seine, quant à elles, sont caractérisées par des abondances intermédiaires (entre 100 et 2000 ind. / 0,4 m<sup>2</sup>), sur des fonds sableux parfois grossiers. Au niveau des fonds vaseux de l'embouchure, les valeurs sont les plus faibles (entre 1 et 1000 ind. / 0,4 m<sup>2</sup>), témoignant encore une fois des fortes contraintes hydrologiques et hydrodynamiques pour la faune.



**Figure 65.** Distribution spatiale des abondances (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) dans les fonds subtidiaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite).

Evolution à long terme : campagnes PECTOW (1988-2006)

Contrairement à la distribution des valeurs de richesse spécifique, il existe une structuration spatiale contrastée qui, dans l'ensemble, est retrouvée chaque année. Si Thiébaud (1994), Thiébaud et *al.* (1997) et Barnay (2003) avaient souligné la structuration de la communauté en "noyaux" d'abondance stables dans le temps, la nouvelle image de la situation en 2006 le confirme. En considérant l'ensemble des situations de 1988 à 2006, trois 'spots' d'abondance sont retrouvés chaque année et localisés en trois zones principales ; en baie de Seine Nord-orientale, dans la partie aval de l'embouchure en prolongement de la Fosse Nord, et entre Cabourg et Ouistreham. Cette structuration spatiale peut être également confirmée en considérant les images obtenues en 2008-2009, ce qui confère au système une grande stabilité sur le long terme de sa structuration spatiale en "noyaux" d'abondances. Comme l'avait déjà évoqué Thiébaud et *al.* (1997) au sujet de la persistance de certains assemblages faunistiques ou de certaines populations, cela suggère l'existence de facteurs environnementaux suffisamment robustes et stables sur le long terme pour pérenniser cet aspect de l'organisation de la faune en spots de fortes abondances. Alors que cette structuration, s'observe chaque année, il existe au sein de cette stabilité spatiale, une variabilité inter-annuelle des valeurs d'abondance. Cela ne concerne cependant pas systématiquement l'ensemble de ces trois 'spots' d'abondance de manière synchrone. Seules les quelques stations à l'embouchure, face à la Fosse Nord et celles situées entre Cabourg et Ouistreham, sont caractérisées par des valeurs très élevées chaque année. En baie de Seine Nord-orientale, les abondances sont nettement plus faibles en 1996. Il peut être également remarqué l'apparition en 2006 d'un nouveau spot de très fortes abondances au large, à l'ouest de Deauville. Si on prête attention à la situation récente, on observe que l'apparition de ce quatrième 'noyau' d'abondance est confirmée sur les images obtenues pour les années 2008-2009. Cependant, le noyau d'abondance situé en face de la Fosse Nord n'est plus visible, et deux stations au droit du débouché en mer se présentent comme un nouveau "spot" d'abondance. Il convient de noter que les années 2008 et 2009 sont caractérisées par des abondances nettement plus élevées, ce qui est à relier à la période d'échantillonnage. Les campagnes 2008-2009 s'étant déroulées en périodes de post-recrutement, elles ont permis de récolter un nombre important d'individus juvéniles. Cette différence majeure est d'ailleurs exacerbée en raison de la maille de tamisage des échantillons qui était de 2 mm concernant le suivi historique, et de 1 mm concernant les campagnes récentes de COLMATAGE. Malgré ces effectifs plus élevés, la structuration en 'noyaux' d'abondance est toujours perceptible. En considérant l'ensemble de ces résultats, il est à noter

que les "spots" d'abondance, quelle que soit leur position exacte, se répartissent le long d'une bande littorale entre Ouistreham et Antifer.

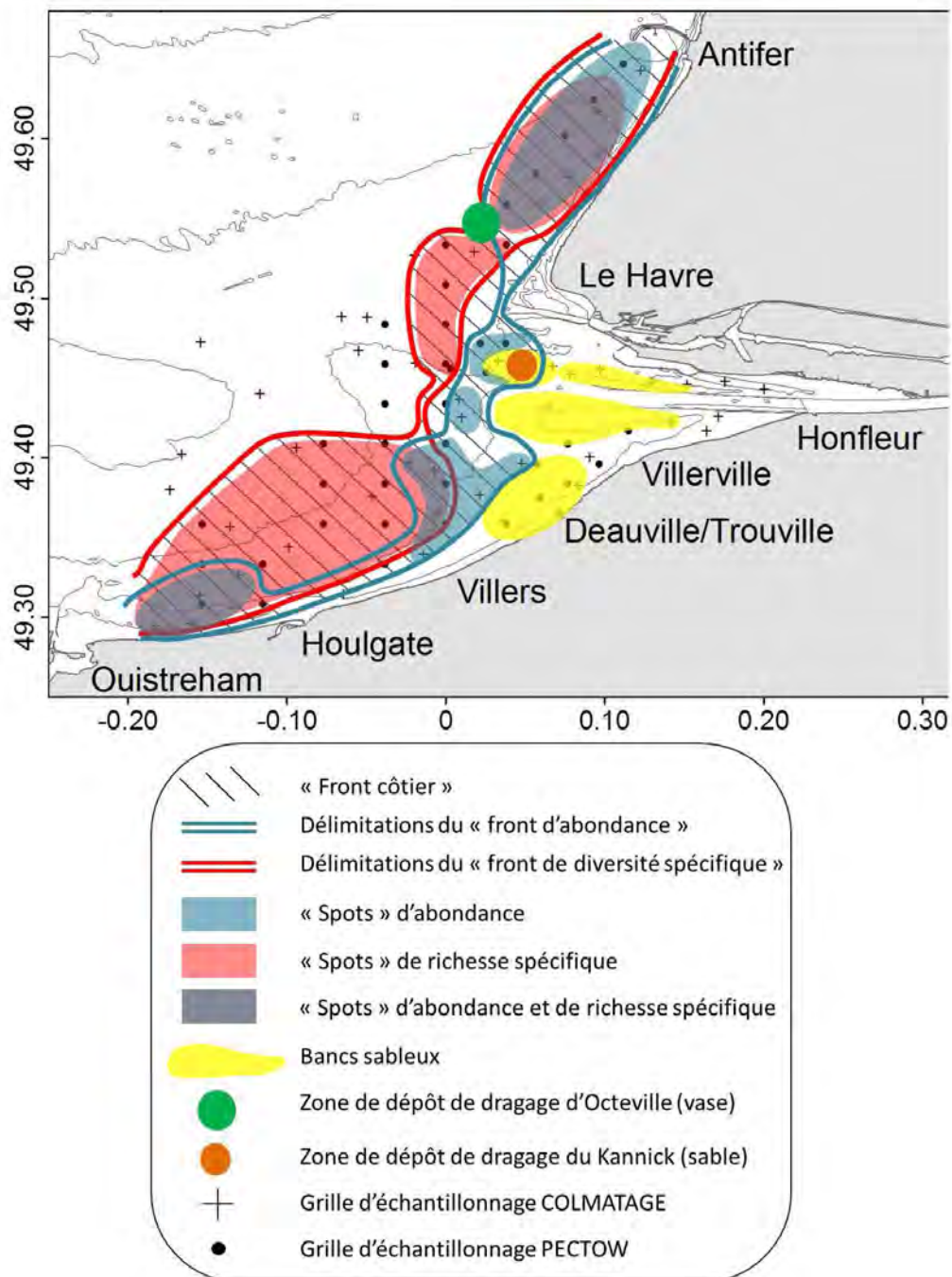
*Organisation de la macrofaune benthique en relation avec l'organisation sédimentaire dans le contexte hydrodynamique et anthropique du système*

Une carte synthétique des différents schémas de structuration de la macrofaune benthique, sur la base des indices de richesse spécifique et d'abondance, est proposée Figure 66. Elle représente de façon simplifiée les différentes zones que ces indices peuvent discriminer, en tenant compte des résultats issus des données du suivi PECTOW et ceux issus des données des campagnes COLMATAGE. Elle a été levée à la main en représentant, dans la mesure du possible et avec lissage, la structuration commune à toutes les années étudiées, témoignant d'une structuration particulière et relativement stable dans le temps. Si on regarde l'organisation de ces indices dans son ensemble, il existe un 'front côtier' délimité 1) à l'ouest par un axe entre Ouistreham et Antifer puis 2) à l'est par un axe entre le Havre et Deauville. A l'échelle du système "baie de Seine Orientale – embouchure", ce "front côtier" est caractérisé par de fortes valeurs de richesse spécifique et abondance. A l'est de ce "front côtier", à l'embouchure, les valeurs de richesse spécifique et d'abondance y sont les plus faibles alors qu'à l'ouest de cette délimitation, ces valeurs y sont intermédiaires. Ce schéma global de structuration de la macrofaune benthique peut être mis en relation avec le schéma général d'organisation des composantes environnementales de la Figure 63. Les faibles valeurs de richesse spécifique et d'abondances rencontrées à l'embouchure interne, peuvent être mises en relation avec les fortes contraintes hydrodynamiques et anthropiques sur ces fonds, mais également aux plus fortes variations de salinité qui y règnent. Les valeurs intermédiaires rencontrées au large sont certes observées sur des fonds soumis à des courants maximums de marée importants, mais la présence d'espèces marines nombreuses y est favorisée à la fois par les moindres variations de salinité et par l'hétérogénéité des fonds caractérisés par un mélange de sables et de sédiments plus grossiers, créant divers habitats et abris pour la faune.

Alors que les mécanismes de compétition pour l'espace et la ressource sont connus, force est de constater qu'au sein du "front côtier", et au sein même des stations, de nombreuses espèces cohabitent. Les valeurs d'abondance comme de richesse spécifique y sont les plus importantes et de nombreux facteurs peuvent y être associés. Alors que Gentil et *al.* (1986) suggéraient que les fortes richesses spécifiques et abondances résulteraient 1) d'un environnement hypertrophique et 2) d'un régime hydrodynamique macrotidal qui préviendrait l'hypoxie en

favoriserait la dispersion des polluant ; l'étude menée précédemment sur la texture et l'organisation sédimentaire montre que la grande hétérogénéité sédimentaire caractérisant ces fonds, pourrait favoriser la coexistence d'espèces, pourtant d'affinités sédimentaires différentes, et ainsi expliquer en partie les fortes richesses spécifiques rencontrées. Ces constats amènent à penser que l'hétérogénéité sédimentaire, une source de nourriture suffisante et non limitant pour la faune, ainsi qu'un forçage global par les conditions hydrodynamiques, contribueraient à expliquer ce schéma de structuration. Si on s'intéresse plus précisément à la structuration à l'intérieur de ce "front côtier", il est remarqué que les zones de plus fortes valeurs de richesse spécifique et de plus fortes valeurs d'abondance, stables dans le temps, ne se superposent pas nécessairement. Deux fronts au sein du front côtier caractérisé par de fortes valeurs de richesse spécifique et abondance peuvent être distingués : l'un dénommé 'front d'abondance' où se répartissent les principaux noyaux d'abondance, l'autre 'front de diversité spécifique' où se répartissent les principaux 'spots' de richesse spécifique. Il est à remarquer que si ces fronts ne se superposent pas strictement, ils se chevauchent au centre du front côtier créant ainsi, au sein de cette zone de chevauchement, des zones particulières à la fois riches en nombre d'espèces et très abondantes. A l'est de cette zone de chevauchement, dans la partie la plus aval de l'embouchure, sont identifiées des zones de fortes valeurs d'abondance sans que le nombre d'espèces n'y soit particulièrement important. A l'ouest de cette zone de chevauchement, de part et d'autre des sables dunaires délimités par la sonde des 10 m, sont identifiées des zones de fortes richesses spécifiques sans que les abondances n'y soient spectaculaires. Ce point de vue de l'organisation de la macrofaune benthique permet de mettre en évidence une compartimentation du secteur étudié en zones relativement distinctes. Cette structuration durable à l'échelle de la trentaine d'années peut également être comparée au point de vue de l'organisation hydro-morpho-sédimentaire de la Figure 63. La superposition des "noyaux" d'abondance avec les 'spots' envasés est remarquable. Il semblerait alors que la structuration de la macrofaune benthique en zones de fortes valeurs d'abondance, stables dans le temps, puisse être expliquée de la même façon que la structuration des zones permanentes de dépôts de matériaux fins. Ces constats permettent de mettre en avant l'importance des processus hydrodynamiques, qu'ils soient régis à grande échelle (courants dominants de marée, tourbillons anticycloniques) ou localisés (processus de sédimentation en 'pieds de bancs'), en tant que facteurs communs de la structuration des composantes benthique et sédimentaire, observée à l'échelle du système 'baie de Seine Orientale – embouchure'. Ces processus agiraient, à différentes échelles, comme des zones d'accrétion pour les sédiments fins comme pour la faune. On peut néanmoins remarquer que

les stations localisées dans la partie la plus aval de l'embouchure sont caractérisées par de très fortes abondances sans que les valeurs de richesse spécifique ne soient aussi élevées. Directement influencées par les eaux de la Seine, il est possible que de plus fortes variations de salinité expliquent le moins grand nombre d'espèces rencontré en ces sites.



**Figure 66.** Carte synthétique et simplifiée de la structuration commune (intégrant les données des années 1988-1991-1996-2001-2006 du suivi PECTOW et des années 2008-2009 des campagnes COLMATAGE) du système "baie de Seine Orientale – embouchure" en termes de spots d'abondance et de richesse spécifique. Se référer au texte pour explications.

#### 4.9.5. Principaux apports de la thèse

La difficulté majeure à l'étude rigoureuse des relations entre les différentes composantes du système 'baie de Seine Orientale – embouchure' pour en comprendre le fonctionnement et l'évolution, repose sur l'acquisition de résultats et de données le plus souvent non comparables directement, aussi bien au sein d'une même discipline (en raison de méthodologies différentes) qu'entre ces disciplines (manque d'échantillonnages conjoints). Alors que les campagnes de prospection à la mer ont été motivées par des intérêts le plus souvent divergents et non concertés, il a été choisi, pour juger de la structuration et de l'évolution des fonds de la baie de Seine Orientale, de ne sélectionner que les campagnes du suivi PECTOW (1988-1991-1996-2001-2006), qui se sont déroulées juste avant la période de recrutement au début du printemps, à l'échelle de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni*. Il est à noter que les valeurs d'abondances observées durant ce suivi ne sont pas comparables strictement avec celles observées durant la période de post-recrutement des campagnes COLMATAGE, en raison 1) des plus fortes valeurs d'abondances observées en 2008-2009, dû au nombre important de recrues et 2) de la maille de tamisage différente (1 mm pour COLMATAGE et 2 mm pour PECTOW) qui influence le nombre d'espèces et d'individus recensés. Cependant, la notion de 'spots' d'abondance et de richesse spécifique est relativement bien préservée entre les deux périodes, en ce qui concerne l'aire d'échantillonnage commune.

La synthèse des travaux antérieurs relatifs à l'étude de la structuration et l'organisation du compartiment benthique, une revisite des données historique ainsi que l'analyse des données nouvellement acquises, a permis de proposer un schéma de l'organisation générale du système. Il est montré que la macrofaune benthique est structurée en zones de fortes valeurs de richesse spécifique et en zones de fortes valeurs d'abondance retrouvées chaque année. Ces zones sont en recouvrement partiel, autorisant l'existence de zones de fortes richesses spécifiques et abondances, notamment en baie de Seine Sud-orientale, au nord-ouest de Deauville, et en baie de Seine Nord-orientale, le long des côtes du Pays de Caux. La reproductibilité de ce schéma témoigne de sa structuration par un ou une combinaison de facteurs favorables et suffisamment robustes. L'étude ne s'est pas cantonnée à l'étude des relations benthos-sédiments sur la simple considération de données granulométriques, mais s'étend à la notion de contexte de dynamique hydro-morpho-sédimentaire, à des échelles spatio-temporelles variées. Les résultats mènent vers un constat majeur : le schéma de structuration de la macrofaune benthique en 'spots' d'abondance retrouvés chaque année, est superposable au schéma de structuration des sédiments en 'spots' de vase permanents. Il

semble alors que les processus hydrodynamiques régis à la fois 1) à l'échelle du système Manche – baie de Seine (réduction de l'intensité des courants de marée et formation de courants giratoires créant des zones d'accumulation à la côte), et 2) à l'échelle des processus de sédimentation de matériaux fins en 'pieds de bancs' localisés à l'embouchure ; sont les facteurs de structuration principaux régissant l'organisation à la fois de la distribution des sédiments et d'une partie de la macrofaune benthique, à l'échelle du système baie de Seine Orientale – embouchure. Si les 'spots' d'abondance peuvent se situer au droit du débouché en mer et donc des apports trophiques provenant de l'estuaire, ce n'est pas le cas des 'spots' de richesse spécifique qui ne sont pas retrouvés à l'embouchure, probablement en raison des conditions de salinité plus variables. Ces zones de fortes valeurs de richesse spécifique sont localisées à la périphérie de zones de fortes valeurs d'abondance, et sont en chevauchement avec elles pour les zones plus sous influence marine. Il est à noter que la cohabitation à la fois d'espèces marines nombreuses et d'un petit nombre d'espèces abondantes et caractéristiques de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni*, est favorisée par la présence d'habitats sédimentaires hétérogènes, comme il a été constaté au travers de l'analyse texturale des sédiments. Du point de vue de l'organisation de la macrofaune benthique dans le contexte hydro-morpho-sédimentaire du système baie de Seine orientale – embouchure, il est proposé de revenir aux questions posées dans les objectifs de la thèse et d'y apporter des éléments de réponse en fonction des connaissances antérieurement et nouvellement acquises.

- *Pourquoi les études antérieures n'ont pas montré de relations évidentes entre la macrofaune benthique et les sédiments au sein du système baie de Seine Orientale – embouchure?*

Les études antérieures, notamment celles de Thiébaud (1994) et Barnay (2003), n'avaient pas clairement mis en évidence de relations claires entre les assemblages de la macrofaune benthique, réalisés selon différentes méthodologies, et les sédiments. Comme évoqué par Ghertsos (2002), l'échelle d'étude de ces relations n'était peut-être pas adaptée. Si à l'échelle de la Manche ou à l'échelle du système baie de Seine Orientale – embouchure, les assemblages faunistiques et les faciès sédimentaires sont superposables, c'est probablement que les situations rencontrées sont bien contrastées. Toutes les fractions granulométriques des cailloutis aux vases sont prises en compte, alors qu'à l'échelle de la communauté à *Abra alba* - *Pectinaria koreni* où se sont situées COLMATAGE, seuls les sables et les vases sont bien représentés et sont en mélange parfois hétérogènes. En effet, les assemblages faunistiques



issus de l'analyse PACP sur les données 2008-2009, réalisée à l'échelle du système (voir l'analyse dans la thèse en annexe du rapport) se sont montrés comparables avec les communautés décrites dans les années 1970. Malgré les méthodologies d'échantillonnage et les méthodes d'analyse différentes, certaines similitudes sont retrouvées avec la présence 1) d'un ensemble bien représenté par *Abra alba* et *Pectinaria koreni* installé en zone côtière sur des fonds hétérogènes, entre les fonds du large et les fonds de l'embouchure, 2) d'un ensemble bien représenté par *Macoma balthica* au sein des fonds envasés à l'embouchure, 3) de fonds sableux dunaires au large et 4) de sédiments hétérogènes le long du Pays de Caux et en une zone proche du Parfond. Il est à noter que si des entités faunistiques ont pu être mises en relation avec un contexte hydrosédimentaire, cela repose sur l'existence, au sein de l'aire étudiée, d'ensembles sédimentaires encore relativement contrastés, ce qui n'est pas le cas au sein à l'échelle plus restreinte de la communauté à *Abra alba* - *Pectinaria koreni*. Les espèces les plus dominantes ont souvent été choisies pour caractériser les assemblages formés, elles peuvent cependant être tolérantes à une large gamme de pourcentages de différentes classes granulométriques, comme en témoigne leur position centrale sur l'ordination des analyses OMI (voir l'analyse dans la thèse en annexe du rapport). Elles ne reflètent donc pas uniquement un habitat sédimentaire particulier, mais aussi l'existence d'autres facteurs significativement structurants. Il a pu être mis en avant le lien étroit existant entre la présence en forte densité de plusieurs de ces espèces dominantes comme *Abra alba*, *Pectinaria koreni* et *Owenia fusiformis*, et les processus de sédimentation de matériaux fins en pieds de bancs ou encore devant Antifer et Ouistreham, probablement en liaison avec des conditions hydrodynamiques particulières (courants résiduels dus à la marée et à la morphologie des fonds et de la côte) favorisant la sédimentation. Les travaux antérieurs vont dans ce sens en montrant qu'un processus de rétention larvaire en relation avec : 1) une migration ontogénique verticale des larves en relation avec la circulation en double couche estuarienne ; 2) les faibles courants résiduels et 3) l'existence d'un front estuarien limitant l'expulsion des larves hors du système, pourrait expliquer la persistance de la communauté et sa structuration en "noyaux d'abondance" (Thiébaud, 1994 ; Olivier, 1997 ; Barnay, 2003). L'étude de la structure et de la texture des sédiments, grâce aux photographies prises sur les échantillons de sédiments récoltés lors des campagnes récentes (2008-2009), a mis en avant que les sédiments abritant la communauté à *Abra alba* - *Pectinaria koreni* étaient caractérisés par une grande hétérogénéité, liée au mélange des différentes fractions granulométriques, des fines aux sables grossiers. De plus, concernant des fonds aussi hétérogènes, il a été observé que le réplikat dédié à l'analyse granulométrique n'était parfois pas représentatif des autres réplikats prélevés

pour analyse faunistique. Aussi, il est possible que la difficulté à mettre en relation la faune avec la granulométrie des sédiments puisse être en partie due à l'absence prise en compte de l'hétérogénéité à petite échelle (du répliat à la station). Il peut en effet, au sein d'une même station, être rencontré des espèces à affinité sédimentaire différentes. Au sein de cette communauté, il n'y a donc pas de cortèges faunistiques clairement distincts en relation avec la nature des sédiments, tout comme il n'y a pas de faciès identifiable sur la base des données granulométriques qui soit spatialement distincts.

- *Existe-t-il une réponse de la macrofaune benthique à l'envasement constaté par les sédimentologues au sein du système baie de Seine Orientale – embouchure?*

Dans un système anthropisé, marqué par une dynamique hydro-morpho-sédimentaire complexe et par de fortes variations spatio-temporelles d'abondances qui caractérise certaines espèces, il est difficile de percevoir, à partir des grilles d'échantillonnage de PECTOW, si des changements significatifs se sont produits ces 20 dernières années. Barnay (2003), à partir d'analyse multivariées sur les données de granulométries des années 1988-1991-1996-2001, n'avait pas mis en évidence un envasement des fonds que ce soit à l'échelle de l'aire échantillonnée qu'à l'échelle de la Rade de la Carosse. Aussi, les analyses portées sur les données faunistiques n'avaient pas montré de tendance particulière. Cependant, les études menées par les sédimentologues avaient montré l'envasement de la baie de Seine Orientale. Il est à noter que les cartes sédimentaires témoignant de l'envasement des sédiments ont été réalisées en tenant compte d'un plus grand nombre de prélèvements et intègrent la variabilité saisonnière en compilant les échantillons prélevés sur plusieurs saisons et années. Il est probable que les images obtenues à partir des grilles d'échantillonnage de PECTOW ne soient pas suffisantes pour rendre compte d'un envasement en raison notamment d'un trop faible nombre de points échantillonnés, n'intégrant ni l'hétérogénéité à petite échelle caractérisant les fonds étudiés, ni les phénomènes saisonniers (redistribution des vases en période d'étiage après les épisodes de crues) et/ou le caractère fortement remobilisable de ces vases. De plus, les crues ne se produisent pas forcément aux mêmes dates chaque année, et ne sont pas de même intensité tous les ans, pouvant entraîner une variabilité spatiale et temporelle des apports en matériaux fins à ces dates d'échantillonnage. D'après l'examen des cartes de distribution des fines de 1988 à 2009 issues des données de PECTOW et de COLMATAGE, il n'a pas été possible non plus de mettre clairement en évidence un envasement progressif du système baie de Seine orientale – embouchure jusqu'en 2001. Néanmoins, depuis 2006, il

semblerait que les teneurs en fines dans les sédiments soient plus importantes que pour les années précédentes, notamment en baie de Seine Nord-orientale et en baie de Seine Sud-orientale. D'autre part, il a été noté, dans l'ensemble, une augmentation des teneurs en sables moyens et une diminution des teneurs en sables fins. Cependant, au regard de ces constats et de la grande prudence à accorder aux données de granulométrie, il n'est toujours pas possible de conclure significativement à un bilan positif de l'envasement dans ce secteur. A nouveau, seule la cartographie fine des faciès sédimentaires établie par Lesourd sur la base des données récentes 2008-2009 permet de confirmer l'envasement des fonds de l'embouchure et des fonds subtidiaux proches, en comparaison avec la cartographie de la situation 1993-1996. Si la couverture spatiale n'est pas aussi étendue que celle de PECTOW ou de COMATAGE, le constat d'un déplacement vers l'aval, et plus particulièrement vers le nord-ouest, de l'envasement des fonds est nettement visible sur l'image de la situation en 2008-2009, et permet de tendre vers l'hypothèse d'un envasement des fonds plus au large.

Les résultats de l'analyse PACP des données faunistiques récentes, réalisée à l'échelle du système semblent en faveur d'un envasement au sein de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* par rapport à la situation des années 1970 (Thiébaud, 1994). En effet, la présence d'un assemblage frontal, dont certaines espèces vasicoles comme *Melinna palmata* et *Corbula gibba* sont caractéristiques, a été identifié proche mais dissocié de l'assemblage sub-estuarien (caractérisé notamment par *Abra alba* et *Pectinaria koreni*). Puisqu'une approche basée sur les assemblages faunistiques ne semble pas être pertinente pour l'étude des relations faune-sédiments à l'échelle de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni*, l'étude de la réponse de la macrofaune benthique aux changements sédimentaires sur une fenêtre temporelle d'une vingtaine d'années (campagnes PECTOW et COLMATAGE), a été abordée selon une approche plus spécifique. L'analyse OMI basée sur la définition de niches écologiques des espèces a été réalisée simultanément sur les données de faune et de granulométrie. Elle a permis de définir la notion de 'niche sédimentaire' des espèces, et de mettre en évidence, au sein du jeu de données, des espèces indicatrices d'un bilan positif de l'envasement sur le long terme à l'échelle de la baie de Seine Orientale. C'est notamment le cas en baie de Seine Nord et Sud-orientale, par l'extension de l'aire de distribution et l'augmentation des effectifs au cours du temps de deux espèces à affinité vasicole : les mollusques bivalves *Corbula gibba* et *Nucula nitidosa*. Cet envasement, exacerbé en baie de Seine Nord-orientale, en raison des rejets fréquents de dragage sur le site d'Octeville, est marqué par l'augmentation importante de l'abondance de la nouvelle espèce en baie de Seine l'annélide polychète tubicole et vasicole *Melinna palmata*. De plus, la présence nouvelle dans

cette zone d'un décapode vasicole *Asthenognathus atlanticus* est également le signe de l'envasement prononcé de ces fonds et il faut y voir, en comparaison avec la baie de Seine Sud-orientale, la marque de son anthropisation. Au regard des résultats acquis concernant l'étude de la variabilité inter-annuelle du recrutement d'espèces abondantes, sur la base des données de biométrie 2008-2009, il est d'ailleurs probable que la diminution des effectifs de l'annélide polychète tubicole et sabulicole *Owenia fusiformis* sur ces fonds, puisse être attribuée à l'atteinte progressive d'un seuil du taux de fines dans ces sédiments qui soit limitant pour son recrutement. L'examen de la distribution des abondances de cette espèce a également permis de discuter de son rôle structurant pour les sédiments. Alors que les apports en vase ne sont pas aussi massifs en baie de Seine Sud-orientale qu'en baie de Seine Nord-orientale, la présence de mélanges sablo-vaseux plus ou moins cohésifs en baie de Seine Sud-orientale peut être favorisée par la présence des fortes densités parfois rencontrées de cet annélide sédentaire. Il peut être considéré comme ingénieur ayant à la fois 1) le rôle de piéger des particules fines par l'émergence de ses tubes à la surface du substrat et 2) le rôle de maintenir sur son aire de répartition les sédiments fins sablo-vaseux en favorisant leur cohésion. Ainsi, s'il est admis que les sédiments puissent avoir un rôle structurant pour la faune, l'inverse semble possible même à l'échelle de la baie de Seine Orientale.

Il sera nécessaire de poursuivre cette approche spécifique pour améliorer la compréhension de l'organisation de ce compartiment benthique. A ce titre, l'étude de l'affinité et de la tolérance des espèces aux différents facteurs de son environnement, de leur mode de vie en général, constitue un axe de recherche à poursuivre pour pouvoir tendre vers cet objectif. Une recherche approfondie au sein de la bibliographie devrait dégager des lacunes dans les connaissances et de définir, parmi elles, celles dont il serait nécessaire de combler. Outre la possible mise en place d'expérimentations en laboratoire, il serait par exemple souhaitable de s'intéresser aux autres systèmes dont la composante macrobenthique est comparable, pour améliorer les modèles de réponse des espèces.

- *Quelles sont les échelles spatio-temporelles d'observation du compartiment benthique (macrofaune benthique et sédiments) qui soient pertinentes à prendre en considération pour le développement d'une stratégie de son observation à long terme au sein du système baie de Seine Orientale – embouchure ?*

Dans le contexte des réflexions sur l'observation à long terme du compartiment benthique (macrofaune et sédiment), plusieurs questions se posent quant à la stratégie d'échantillonnage

à adopter. Ces questionnements s'articulent autour des choix à faire quant au nombre de stations à prévoir, à leur localisation et fréquence d'échantillonnage. Le point de vue synthétique, proposé dans le travail de thèse de S. Alizier, des informations relatives à la compréhension du fonctionnement, de l'organisation, ainsi qu'à l'évolution du compartiment benthique à l'échelle du système baie de Seine orientale – embouchure, peut servir de base à cette réflexion. Si un choix doit se faire entre adopter un suivi stationnel ou bien sectoriel de ce compartiment, il semble, au regard des connaissances relatives à son organisation, qu'il faille **privilégier un suivi sectoriel**. Les points de vue de l'organisation hydro-morpho-sédimentaire et de l'organisation en 'spots' de richesse spécifique et abondance abordés dans cette étude permettent en effet de rendre compte d'une compartimentation du système en zones, certes spatialement stables dans le temps, mais dont les fonctionnements relativement distincts peuvent conduire à des évolutions asynchrones à court comme à long terme. Les résultats obtenus suite à l'étude d'une de ces zones ne seront pas représentatifs de l'ensemble du système étudié, et son évolution ne sera certainement pas synchrone avec celles d'autres zones du système. Opter pour un suivi stationnel rendrait difficile 1) l'approfondissement des connaissances relatives à l'étude des relations entre les différentes composantes de cet écosystème complexe, qui s'organisent à des échelles spatio-temporelles variées, ou encore 2) l'évaluation, par exemple, des conséquences sur la faune d'un envasement du système s'exprimant sur le long terme. En effet, si la réponse de la faune à l'envasement des fonds subtidiaux de la baie de Seine Orientale a pu être mise en évidence, c'est grâce à l'examen à la fois des abondances de certaines espèces et de l'extension de leur distribution.

En termes de grille d'échantillonnage, opter pour le maillage utilisé dans le cadre du suivi PECTOW semble pertinent, mais un ou deux points supplémentaires seraient alors à prévoir au sein des sédiments sableux du large pour juger de la progradation future de l'envasement vers l'aval du système. Concernant les fonds de l'embouchure, un échantillonnage resserré serait l'idéal, mais compte tenu du coût et du temps que cela représente, il serait peut-être judicieux de se baser sur les cartographies fines comme celles des ports, concernant la bathymétrie et de celle des sédimentologues, concernant la distribution des sédiments superficiels, afin de sélectionner quelques zones clés à suivre, en relation par exemple avec les processus de sédimentation en pieds de bancs qui semblent structurants pour les sédiments fins comme pour une partie de la faune. Le recours à ces cartographies fines des sédiments superficiels et de la bathymétrie s'avère indispensable au sein de cette zone, marquée par une grande hétérogénéité spatio-temporelle des conditions hydro-morpho-sédimentaires, pour rendre compte de son évolution à long terme.

Concernant la fréquence de l'échantillonnage de la macrofaune, **un pas de temps de 5 ans** comme celui mis en œuvre dans le cadre du suivi PECTOW semble pertinent. Réduire cette fréquence ne serait pas d'une grande utilité. En effet, si une réponse de la faune à l'envasement a pu être montrée au travers de ce suivi sur une échelle de temps d'une vingtaine d'années, les résultats mériteraient d'être confirmés par l'acquisition d'images supplémentaires de situations ultérieures. Ainsi, la mise en évidence de changements au sein du compartiment benthique (macrofaune et sédiment) nécessite la prise en compte d'une fenêtre temporelle large. Un échantillonnage **avant la période de recrutement** semble également à privilégier. Il a l'avantage de procurer des données moins variables qu'en période de post-recrutement, notamment en termes d'abondances, et privilégie un maximum la localisation des stocks d'individus reproducteurs. De plus, le temps de dépouillement des échantillons s'en trouve réduit en raison du moins grand nombre d'individus récoltés.

Il est à noter que ces recommandations doivent être replacées dans le cadre des protocoles déjà existants et proposés dans les divers programmes de suivi du benthos (Directive Cadre sur l'Eau - DCE, Réseau de suivi Benthique de Bretagne - REBENT, Réseau National des Stations et Laboratoires Marine - RESOMAR) ainsi que les recommandations faites pour que les études futures portant sur ce compartiment soient rendues plus comparables (Dauvin & Vasset, 2011). A ce titre, puisque la DCE préconise, pour le suivi du benthos des fonds meubles, qu'une station donnée soit échantillonnée à raison de cinq réplicats à l'aide d'un engin prélevant une surface de 0,1 m<sup>2</sup> de sédiments, il pourrait ainsi être envisagé pour les prochaines campagnes PECTOW, de ne plus échantillonner avec une benne Hamon prélevant sur 0.25 m<sup>2</sup>, mais avec une benne Van Veen ou une mini benne Hamon échantillonnant sur 0,1 m<sup>2</sup> et de faire un double tamisage sur 2 mm (comparaison avec les données antérieures) et 1 mm pour suivre les préconisations des recommandations notamment celles de la DCE et REBENT.

## **5. Evolution de la composante halieutique et définition d'une typologie des habitats marins estuariens basée sur les communautés piscicoles**

« Dans une perspective de développement durable, l'enjeu visé par le Programme Seine Aval, est la restauration des fonctionnalités environnementales de l'estuaire de Seine compte-tenu des attentes des différents usagers. Parmi les fonctionnalités environnementales identifiées figure la capacité d'accueil de l'estuaire vis-à-vis des différents groupes fonctionnels, la richesse et la diversité du patrimoine biologique. Ces fonctionnalités sont notamment liées à la présence, à l'échelle de l'estuaire, d'habitats favorables » (Appel à propositions de recherches ; SA 4- 2007).

L'estuaire et la baie de Seine assurent une fonction de nurserie, indispensable au développement des jeunes poissons qui rejoignent ensuite les populations du large et contribuent ainsi au recrutement, et donc au renouvellement des stocks de poissons adultes. La préservation ou la réhabilitation des habitats nécessaires à la survie et à la croissance des jeunes poissons nécessite de pouvoir les identifier et les caractériser.

Les espèces piscicoles présentent rarement des distributions aléatoires dans la nature. Elles sont plus abondantes à certains endroits qu'à d'autres, arborant ainsi des structurations spatiales sous forme de gradients, d'agrégats ou autres patrons spatiaux. Cette structuration répond principalement à des variabilités environnementales, des interactions biologiques et/ou des perturbations anthropiques. Considérant que ces variabilités peuvent agir à différentes échelles spatiales (e.g ; vent versus bioturbation, Brind'Amour et al., 2005), leur influence sur la faune peut également s'observer sur plusieurs échelles spatiales. Dans ce contexte, l'habitat d'un poisson peut se définir comme un espace (physique, chimique et biologique) associé à certaines structures et fonctions nécessaires à l'accomplissement de son cycle de vie (Hayes et al., 1996). Ainsi, tous les habitats d'un écosystème (p. ex. nurserie côtière) ne sont pas également adéquats pour toutes les espèces à tous les stades de leur vie. La convenance de ces habitats varie donc selon les facteurs environnementaux (abiotiques et biotiques) et les échelles spatiales (et/ou temporelles) qui y sont associés. L'étude des patrons de distribution spatiale générés par la sélection d'habitat par l'ensemble des espèces piscicoles d'une communauté constitue non seulement une composante importante de la compréhension de la dynamique des habitats mais elle représente également une partie essentielle de l'élaboration des stratégies d'échantillonnage (Brind'Amour, 2006).

Dans le cadre du projet COLMATAGE, l'objectif principal de la partie halieutique était de définir une typologie des communautés piscicoles en baie de Seine afin de mieux appréhender



son fonctionnement. Cet objectif se décline en trois grandes sections. Une section méthodologique dans laquelle sont décrites les campagnes halieutiques pilotées par l'Ifremer (Port-en-Bessin) depuis 1995 et une étude portant sur la comparaison des protocoles d'échantillonnage. Une deuxième section portant sur la description de la variabilité spatio-temporelle des peuplements de poissons et dans laquelle sont présentées une analyse des évolutions temporelles et spatiales des peuplements de poissons et invertébrés de baie de Seine (données historiques et contemporaines) et un couplage de données entre le compartiment benthique et les poissons sur la base de données historiques. Et, une troisième section plus fonctionnelle de la nourricerie dans laquelle une emphase a été portée sur trois principales espèces de poissons plats (sole, plie et solenette) et pour lesquelles une étude plus approfondie sur les interactions inter-spécifiques et l'utilisation des habitats a été effectuée.

### 5.1. Les campagnes d'échantillonnage halieutique

Dans le cadre du projet « Colmatage », des échantillonnages halieutiques ont été réalisés en 2008, 2009 et 2010, fin été-début automne, période la plus propice à l'échantillonnage des juvéniles de poissons nés dans l'année qui ont atteint une taille suffisante pour être retenus dans le chalut et ainsi limiter les problèmes de sélectivité et de capturabilité. Les chalutages ont été réalisés selon un protocole standardisé déjà utilisé lors des précédentes campagnes (1995 à 2002).

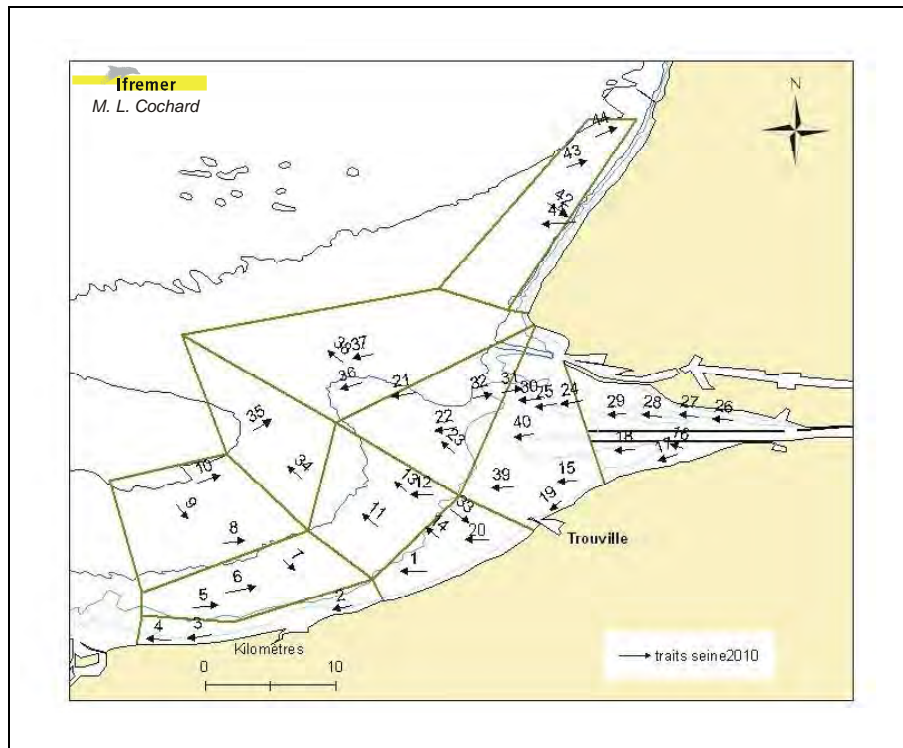
**Tableau 7.** Calendrier de réalisation des campagnes d'échantillonnage halieutique.

Années	Dates	Navire
1995	18/09 au 22/09	Côte d'Azur (professionnel)
1996	16/09 au 23/09	Côte d'Azur (professionnel)
1997	22/09 au 25/09	Côte d'Azur (professionnel)
1998	17/09 au 29/09	Côte d'Azur (professionnel)
1999	02/09 au 06/09	Côte d'Azur (professionnel)
2000	19/09 au 22/09	Côte d'Azur (professionnel)
2001	25/08 au 29/08	Côte d'Azur (professionnel)
2002	16/09 au 20/09	Côte d'Azur (professionnel)
2008	22/09 au 27/09	Côte d'Aquitaine (INSU)
2009	26/09 au 30/09	Sépia (INSU)
2010	26/08 au 30/08	Côte de la Manche (INSU)

L'engin de pêche, adapté à la capture des juvéniles de poissons, principalement de poissons plats, est un chalut à perche chaîné de 2 ou 3 m de large, selon les secteurs prospectés, de maillage de 20 mm (maille étirée), d'ouverture verticale de 0.50 m et muni d'un racasseur<sup>1</sup>. Chaque trait, d'une durée de 15 min, est effectué face au courant à une vitesse comprise entre 2,5 et 2,8 nœuds.

Le secteur échantillonné est compris entre le pont de Normandie à l'Est, Ouistreham au sud, Antifer au nord et la sonde des 20 m à l'ouest. Cette limite des 20 m a été retenue afin de couvrir l'ensemble de la zone de distribution des juvéniles de poissons d'âge inférieur à deux ans. De 44 à 47 traits ont été réalisés chaque année, répartis dans des strates d'échantillonnage basées en grande partie sur la bathymétrie et sur l'éloignement par rapport à l'estuaire (Figure 67).

A chaque trait, sont systématiquement notées les coordonnées et les heures de début et de fin de traîne. Des paramètres hydrologiques ont été recueillis en plus des données de captures et des prélèvements ont été réalisés en 2008 sur les poissons pour analyse ultérieure en laboratoire.



**Figure 67.** Localisation des stations de chalutage.

<sup>1</sup> Racasseur : chaîne située en avant du bourrelet chaîné destinée à gratter le sédiment pour capturer les poissons situés sur le fond.

### *Données hydrologiques*

Depuis 1996, des données environnementales ont été recueillies à chaque trait de chalut, profondeur, température, salinité, au fond et en surface, avec des outils de mesure qui ont évolué au fil du temps. De 2008 à 2010, à chaque fin de trait une sonde « Ysi ME 312 » a été mise à l'eau pour recueil de paramètres hydrologiques (profondeur, température, salinité, et selon les années, turbidité, PH et équivalent chlorophylle), au fond et en sub-surface. Parallèlement à cela, une sonde « Tps S/n 60703 » a été fixée sur le chalut pour un recueil de données en continu (profondeur, température et salinité).

### *Données biologiques*

Après chaque trait, le contenu du chalut a été entièrement vidé. Le tri a été effectué, soit sur la totalité du trait, soit sur un échantillon, en fonction du volume et de l'homogénéité de la capture :

- toutes les espèces ont été triées, identifiées avec dénombrement et pesée par taxon ;
- les poissons d'intérêt commercial ont été mesurés, ainsi que tous les autres poissons plats ;
- les otolithes (ou écailles) ont été prélevés sur certains poissons d'intérêt commercial pour détermination ultérieure des groupes d'âge au laboratoire. Pour d'autres espèces, les groupes d'âges ont été déterminés à partir de clés taille/âge issues d'échantillonnages réalisés en Manche orientale.

### *Prélèvements pour études trophiques*

Dans le but d'étudier les relations trophiques entre les poissons et les proies benthiques, des prélèvements de tractus digestifs et de chair ont été réalisés en 2008 sur les soles (*Solea solea*), les plies (*Pleuronectes platessa*) et les tacauds (*Trisopterus luscus*) de moins de 1an (groupe 0), ainsi que sur l'ensemble des petites soles jaunes (*Buglossidium luteum*).

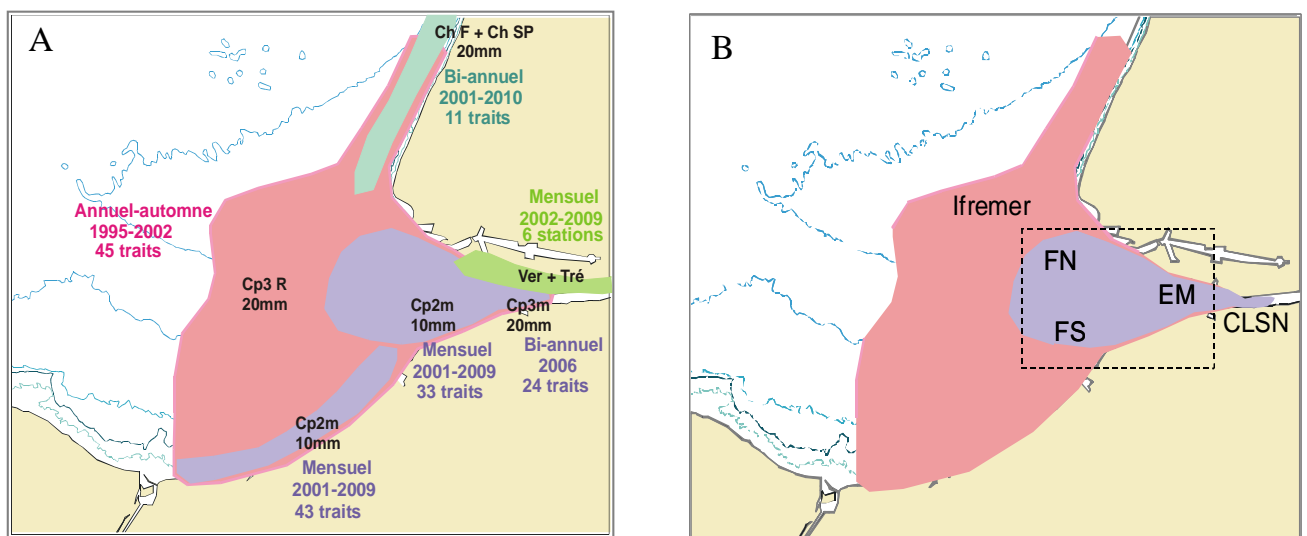
- les tractus digestifs ont été prélevés (au moins 10 par station) puis conservés dans une solution de formol salé à 4% pour analyse ultérieure de leur contenu. Un total de 516 tubes digestifs a ainsi été prélevé.
- les poissons, dont le tube digestif a été ôté, ont été congelés pour dosage ultérieur d'isotopes stables (N et C) au niveau de la chair.

Afin d'identifier les sources de matière organique utilisées par les poissons, et ainsi mieux caractériser les habitats de ces poissons, des prélèvements de crème de vase, de sédiment et de benthos endogé (tamisage sur des mailles de 1 mm et 200  $\mu$ m) ont été réalisés et congelés pour des dosages ultérieurs d'isotopes stables (N et C). Ces prélèvements ont été effectués à l'aide d'une benne Schipeck, à toutes les stations de chalutage 2008 (47 stations).

## 5.2. Comparaison d'engin et protocole de d'échantillonnage pour l'étude des poissons (Analyse détaillée en annexe 4)

L'Ifremer et la Cellule de Suivi du Littoral Normand (CLSN) effectuent depuis un certain nombre d'années des suivis halieutiques en estuaire de Seine répondant à des objectifs différents tels que suivis Port 2000, DCE... Ces suivis ont été réalisés avec des engins similaires mais non identiques, selon une périodicité différente, sur des secteurs plus ou moins étendus vers le large. Afin de pouvoir tirer le meilleur parti des données acquises, un inventaire des données disponibles et des protocoles d'échantillonnages mis en œuvre a été réalisé, suivi d'analyses et d'une réflexion sur les possibilités et limites d'utilisation conjointe de ces données.

Sont identifiés des secteurs et des périodes d'échantillonnage communs pour lesquels la comparaison des différents engins de pêche est réalisée. Les trois secteurs sont l'embouchure (EM), la fosse nord (FN) et la fosse sud (FS) échantillonnés à l'automne en 2000, 2001 et 2002 avec trois engins de pêche différents (chaluts à perche de taille et de maillage différents) et un effort d'échantillonnage différent par secteur et par engin (Figure 68).



**Figure 68.** (A) Secteurs, périodes et engins utilisés au cours de l'ensemble des campagnes halieutiques et (B) secteurs comparés dans le cadre de cette étude. FN : Fosse Nord, FS : Fosse Sud, EM : Estuaire Moyen.

Aucune différence entre les engins de pêche n'a été mise en évidence lors des comparaisons de nombre total d'espèces et d'indices de diversité. Les résultats des analyses de variance indiquent que l'ensemble des interactions (engin\*secteur\*année, engin\*secteur, secteurs) et/ou l'effet simple (engin) n'est pas significatif. L'analyse plus détaillée des données, tenant compte de l'identité des espèces capturées par engin de pêche, indique toutefois certaines différences significatives entre les engins de pêche.

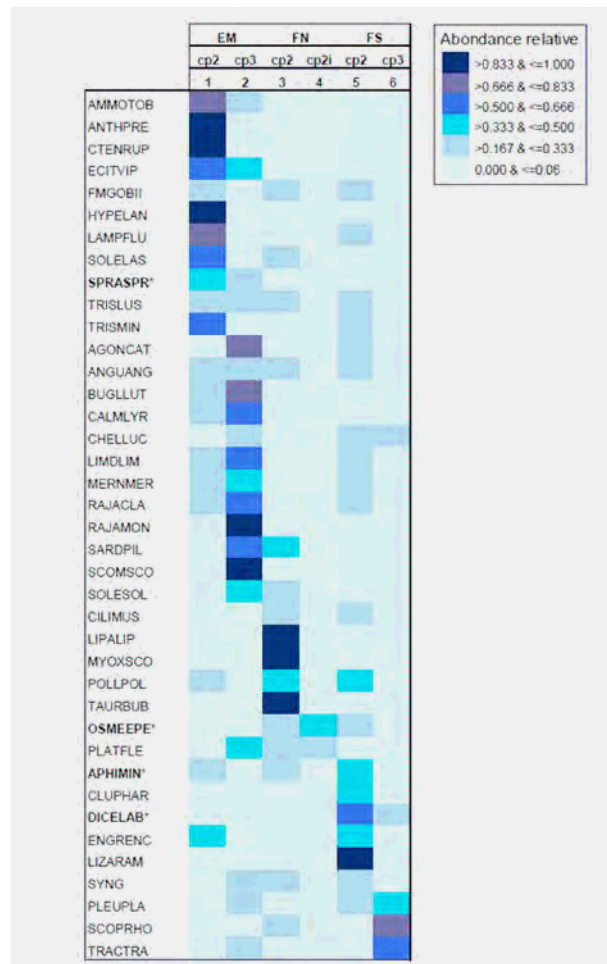
L'influence de l'engin de pêche sur les captures de poissons a été vérifiée à l'aide d'un modèle MANOVA à effets fixes composé d'une interaction triple (Engin\*Secteur\*Année), de deux interactions doubles (Engin\*Secteur et Engin\*Année) et d'un effet simple (Engin). Compte tenu de l'influence potentielle de la capturabilité des différents chaluts sur l'abondance des captures, les analyses ont été conduites en utilisant quatre niveaux de précision (présence-absence, classe d'abondance, densités relatives et densités absolues). Ces niveaux peuvent suggérer la précision à laquelle le couplage des données issues de protocoles différents pourrait être réalisé tout en conservant le maximum d'information. Dans un premier temps, les résultats n'indiquent aucun effet significatif de l'interaction Engin\*Année, suggérant ainsi que la capturabilité des espèces, pour chaque engin de pêche, est la même sur l'ensemble des années testées, tous secteurs confondus.

L'analyse des captures utilisant les densités relatives et les densités absolues montre une interaction triple engin\*secteur\*année significative, suggérant que les différents chaluts ne capturent pas les mêmes densités d'espèces sur les différents secteurs chaque année. L'effet de cette interaction triple n'est pas significatif lorsque les données sont traitées en présence-absence ou en classes d'abondance, ce qui suggère que ce sont les espèces abondantes qui contribuent majoritairement à cette différence interannuelle des captures par engin, par secteur. L'effet de l'interaction double Engin\*Secteur est significatif pour les tests effectués sur l'ensemble des données, quel que soit le niveau de précision utilisé. Les captures sont donc significativement corrélées au secteur et donc à la variabilité spatiale des densités en estuaire de Seine, du moins pour certaines espèces. Il semble que la différence entre les engins soit plus importante en fosse nord que dans les autres secteurs.

La deuxième partie de cette étude porte sur l'identification des espèces pour lesquelles l'effet Engin\*Secteur est important. Une analyse en coordonnées principales (ACoP) a été réalisée sur les données de présence-absence sur la matrice de distance de Jaccard. Cette analyse indique que l'effet engin tel que défini par l'interaction Engin\*Secteur est principalement associé au premier axe et que ce dernier sépare les données de l'Ifremer de celles de la CLSN. Il est à noter toutefois que le premier axe, bien que significatif ( $F = 0,152$ ,  $n_{\text{perm}} = 499$ ,  $df =$

1,  $p = 0,005$ ) n'explique que 2,5% de la variabilité. Une analyse à l'aide de la méthode IndVal (Dufrêne & Legendre, 1997) a permis d'identifier les espèces indicatrices des six groupes, en d'autres termes, les espèces significativement associées à l'un des groupes et donc en partie responsables de l'interaction Engin\*Secteur. Ces espèces sont au nombre de quatre : *Sprattus sprattus*, *Osmerus eperlanus*, *Aphia minuta* et *Dicentrarchus labrax* (Figure 69).

La comparaison des distributions en taille montre l'effet de la taille des mailles sur la capture des individus. Les différences sont notamment marquées pour les poissons plats (*Platichthys flesus*, *Solea solea* et *Pleuronectes platessa*). Bien que la comparaison de taille du premier mode (groupe 0) mérite une étude plus approfondie, d'un point de vue purement descriptif, il semblerait que les indices d'abondance des groupes 0 puissent être utilisés conjointement dans les deux jeux de données (CSLN et Ifremer).



**Figure 69.** Abondance relative au sein de chaque groupe. Les espèces indicatrices de chaque groupe sont marquées d'un astérisque.

### 5.3. Cartographie et analyse des évolutions temporelles des peuplements de poissons et invertébrés de baie de Seine vu par l'échantillonnage au chalut à perche (Analyse détaillée en annexe 5)

Sur l'ensemble des trois campagnes 2008-2009-2010, un total de 108 taxons a été inventorié appartenant aux poissons (39), mollusques (31), crustacés (24), échinodermes (7), annélides (5) et autres groupes (2).

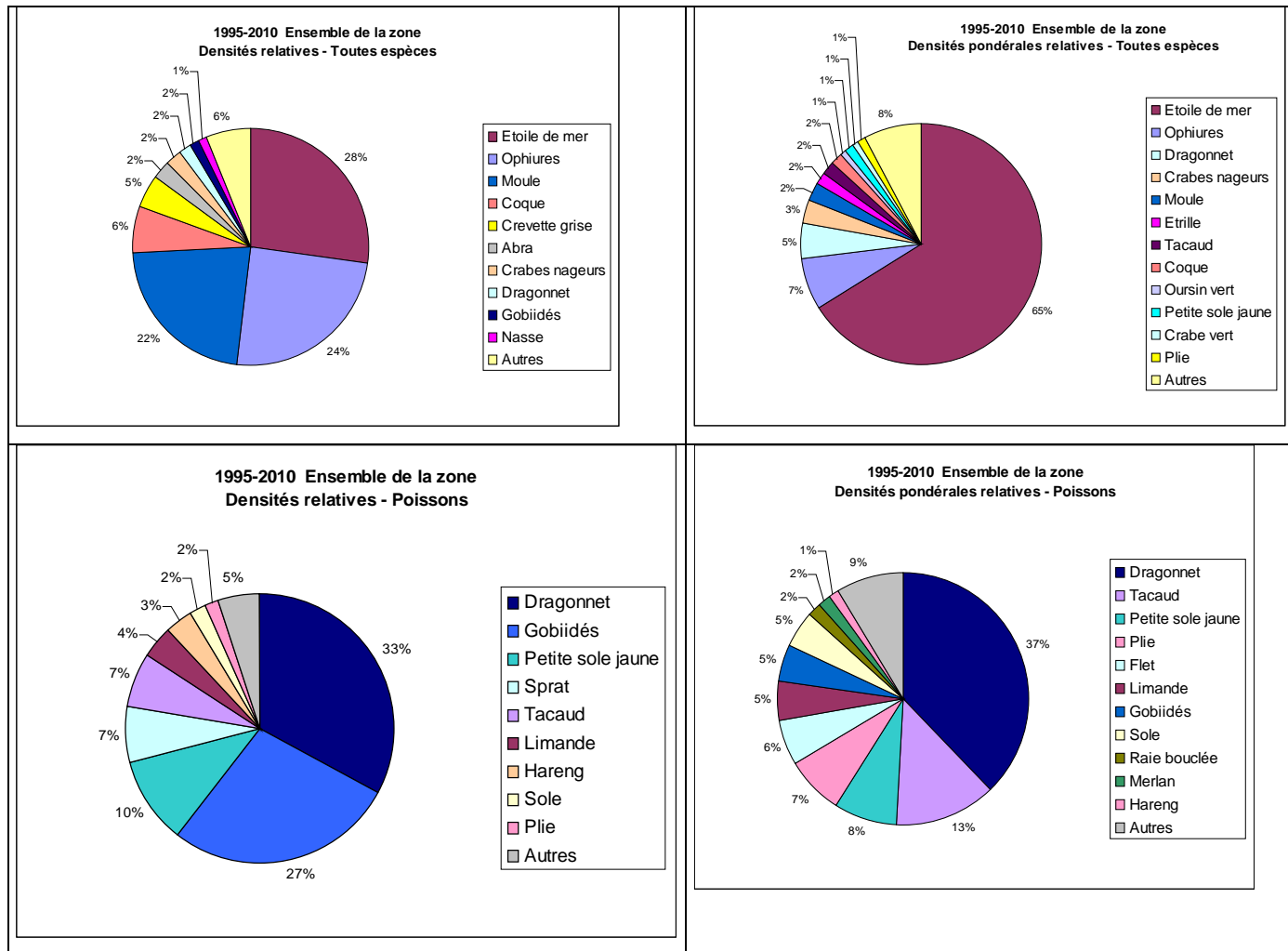
Les données récoltées au cours de ces campagnes ont été analysées avec les données recueillies depuis 1995 afin de replacer les résultats dans l'ensemble de la série temporelle 1995-2010, et pour l'ensemble de la zone échantillonnée. Des comparaisons ont été effectuées entre les deux périodes d'échantillonnage 1995-2002 et 2008-2010.

Malgré des tendances significatives mise en évidence pour quelques espèces, il existe une relative stabilité des populations et peuplements au sein de la série temporelle 1995-2010.

**Les richesses spécifiques** observées ne présentent aucune tendance évolutive.

Parmi les espèces répertoriées quelques-unes ont une forte **occurrence** chaque année. Ce sont les Gobiidés, les crabes nageurs (*Liocarcinus*), l'étoile de mer (*Asterias rubens*) et le dragonnet (*Callionymus lyra*) qui sont observés en moyenne dans plus de 70 % des stations échantillonnées. L'occurrence des crabes nageurs et de l'étoile de mer augmente en fin de période (2008-2010). Parmi les autres espèces, on note une augmentation des occurrences d'étrille (*Necora puber*), de petites seiches (*Sepia officinalis*), du crabe vert (*Carcinus maenas*) et de poissons tels que l'arnoglosse (*Arnoglossus*), l'éperlan (*Osmerus eperlanus*), la barbue (*Scophthalmus rhombus*), la dorade grise (*Spondylus cantharus*) et le rouget barbet (*Mullus surmuletus*). Les occurrences de tacaud (*Trisopterus luscus*), hareng (*Clupea harengus*), sprat (*Sprattus sprattus*) et flet (*Platichthys flesus*) sont en revanche en diminution. Un petit nombre d'espèces contribue chaque année à 75 % de l'**abondance** totale (Figure 70). L'étoile de mer, et les ophiuridés, de par leur abondance numérique, sont **dominantes** pratiquement toutes les années. S'y ajoutent, certaines années, la moule (*Mytilus edulis*) et la coque (*Cerastoderma edule*) présentes en bancs relativement denses. La biomasse est quant à elle largement dominée par l'étoile de mer (*Asterias rubens*) (Figure 70). Trois groupes d'espèces dominent les peuplements de poissons, pratiquement toutes les années, le dragonnet (*Callionymus lyra*), les gobiidés et la petite sole jaune (*Buglossidium luteum*).





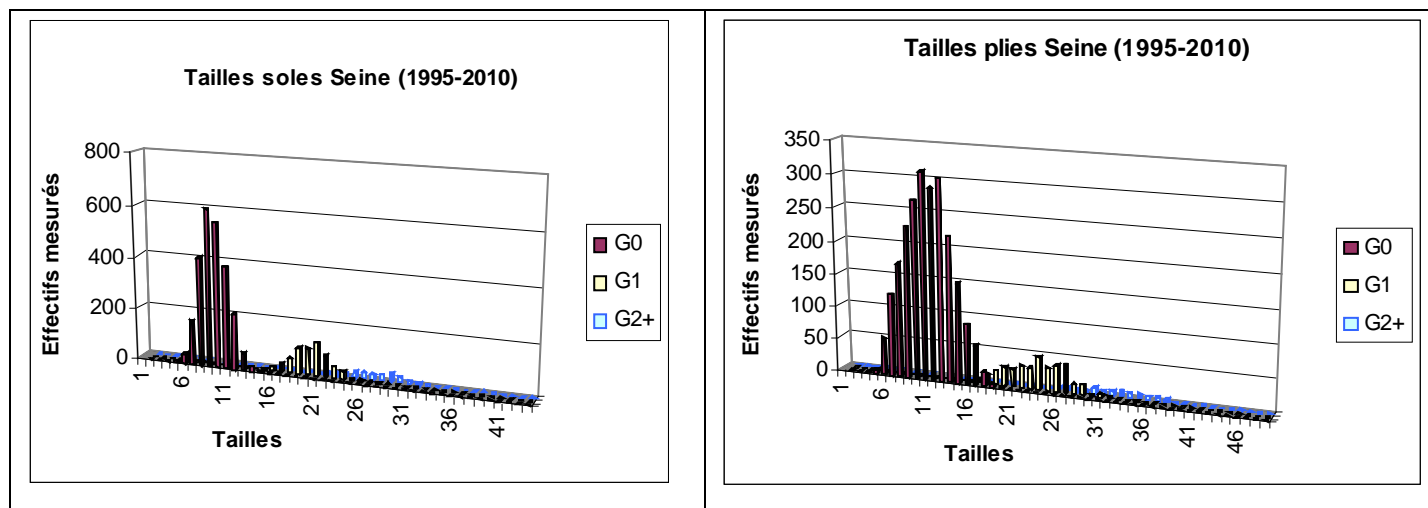
**Figure 70.** Contribution des espèces dominantes à l'abondance et à la biomasse totales, pour l'ensemble des espèces et pour les poissons.

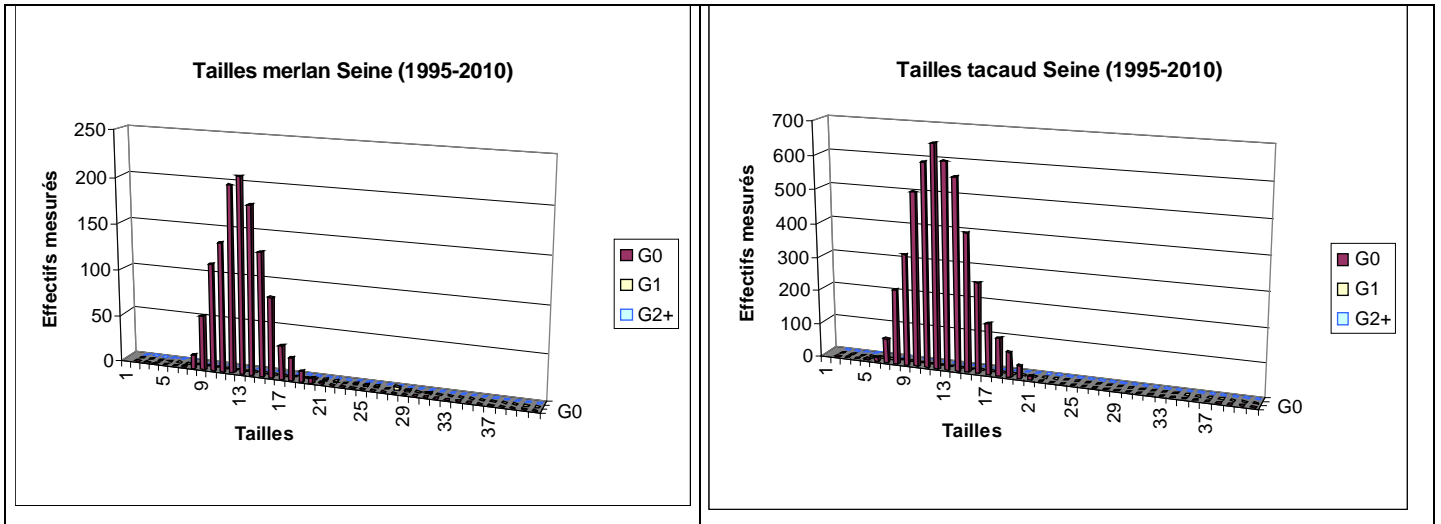
La **variabilité inter-annuelle** d'abondance des différentes espèces ou groupes d'âges est généralement importante mais seules quelques tendances significatives sont observées, qui peuvent être mises en parallèle avec les évolutions d'occurrence. Le tableau 8 présente les principales espèces pour lesquelles les variations d'abondance (ou de log abondance) sont significatives avec mise en parallèle des variations d'occurrences (tendances observées sans tests de signification).

**Tableau 8.** Mise en parallèle des évolutions d'abondance et d'occurrence pour quelques espèces.

Espèces	Occurences	Abondances	Log abondances
<i>Arnoglossus</i>	✿	✿	✿
<i>Buglossidium luteum</i>	✿	✿	✿
<i>Mullus surmuletus</i>	✿	-	✿
<i>Spondyllosoma cantharus</i>	✿	-	✿
<i>Necora puber</i>	✿	✿	✿
<i>Sepia officinalis</i>	✿	✿	✿
<i>Liocarcinus</i>	✿	-	✿
<i>Clupea harengus</i>	✿	✿	✿
<i>Trisopturus luscus</i>	✿	-	✿

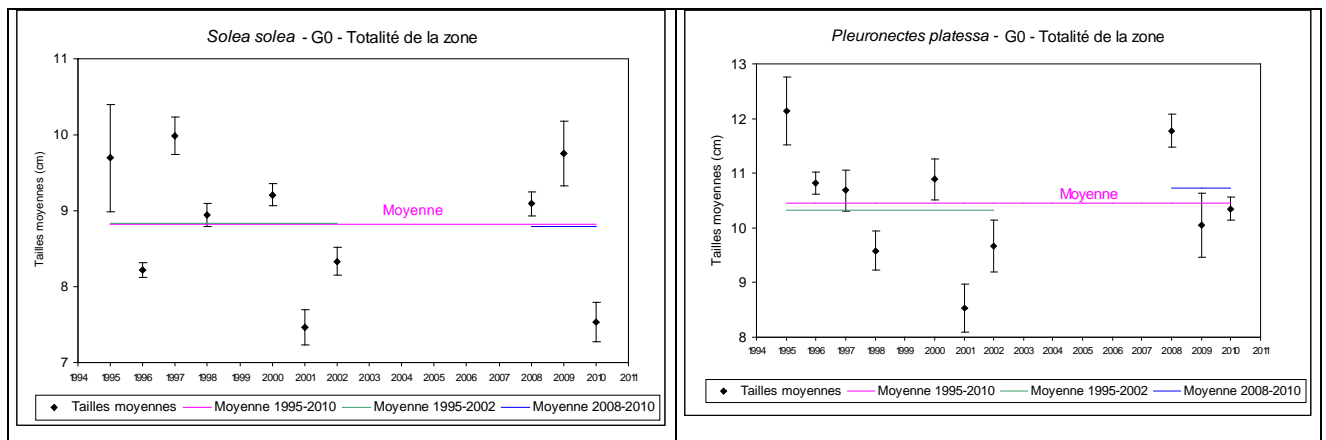
Les poissons d'intérêt commercial échantillonnés sont, dans une grande proportion, des **juvéniles de moins de 2 ans** ou G0 et G1 (ex. sole, plie, limande, sprat) et pour certains d'entre eux, uniquement des poissons de moins de 1 an ou G0 (ex. hareng, tacaud, merlan). Ceci confirme le rôle joué par l'estuaire de Seine en tant que nourricerie de poissons (Figure 71).





**Figure 71.** Structures en taille par groupe d'âge pour sole, plie, merlan et tacaud.

Les **tailles moyennes** des poissons de groupe 0 présentent des variations inter-annuelles importantes mais sans aucune tendance significative. Exemples de la sole G0 et de la plie G0 figure 72.

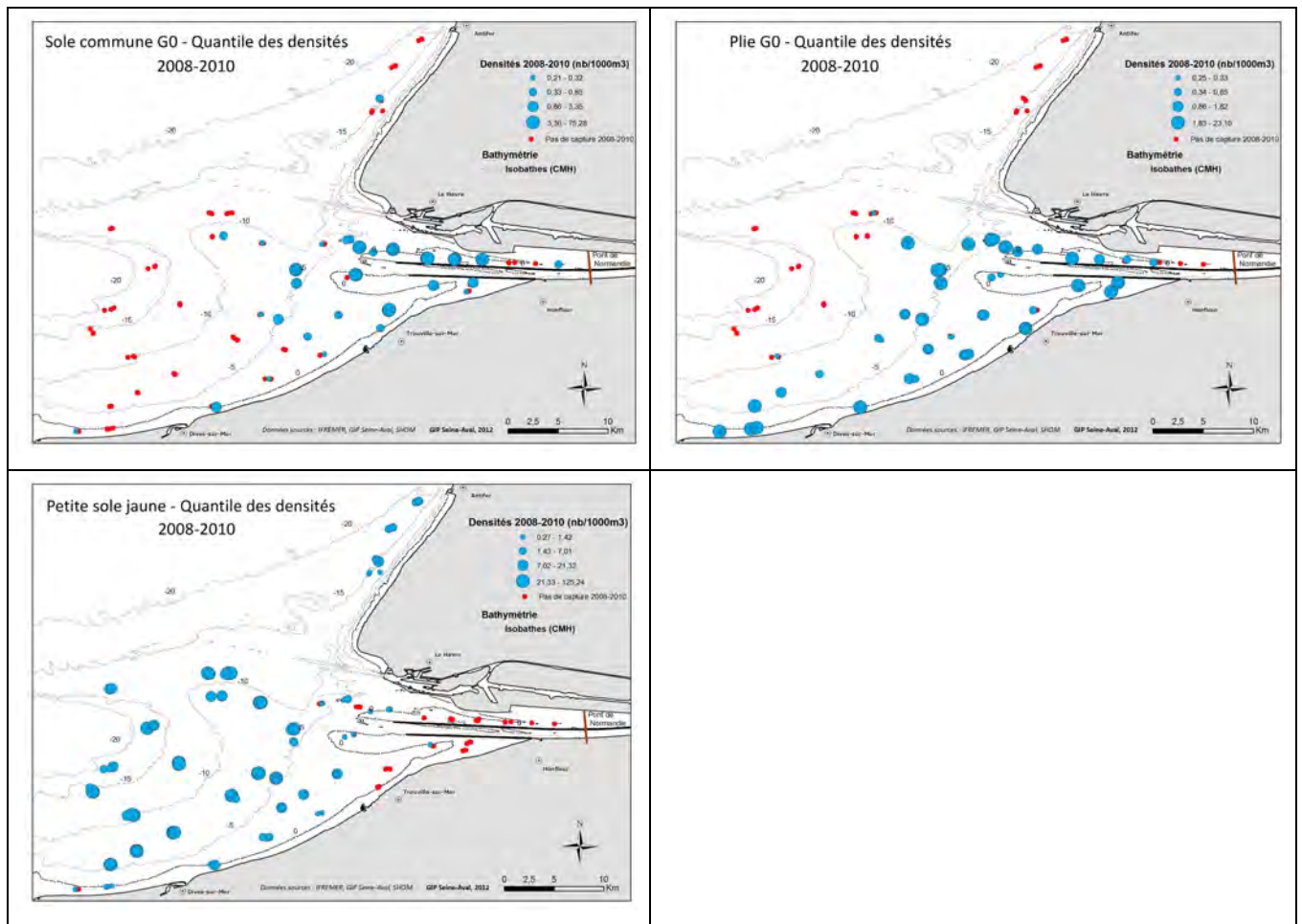


**Figure 72.** Evolution des tailles moyennes par année pour les groupes 0 de sole et de plie.

Une **représentation cartographique** par quantiles permet de mettre en évidence les zones de concentration des soles G0, des plies G0 et des petites soles jaunes (Figure 73).

Les juvéniles de *Solea solea* se concentrent essentiellement à l'intérieur de la sonde des 10 m sur des fonds fonds sableux à sablo-vaseux. Ils sont relativement tolérants à la dessalure : ils tolèrent de fortes variations de salinité (33,70 à 30,58). Il semblerait que les zones de concentration soient plus étendues les années de plus fortes abondances et plus fortes

occurrences. Les juvéniles de *Pleuronectes platessa* se répartissent également à l'intérieur de la sonde des 10 m au niveau de l'embouchure de l'estuaire et le long de la côte entre le Havre et Ouistreham. Ils sont présents sur des fonds sableux. Cette espèce semble être plus tolérante à la dessalure (de 34,17 à 31,51) que les *Buglossidium luteum* qui sont principalement retrouvés en périphérie de l'estuaire, à l'extérieur de la sonde des 10 m sur des fonds sableux et sablo-vaseux. Cette espèce évite les eaux de faibles salinités (< 32,68). L'extension de sa distribution vers l'estuaire peut être mise en parallèle avec les années sèches et de faible débit de la Seine.



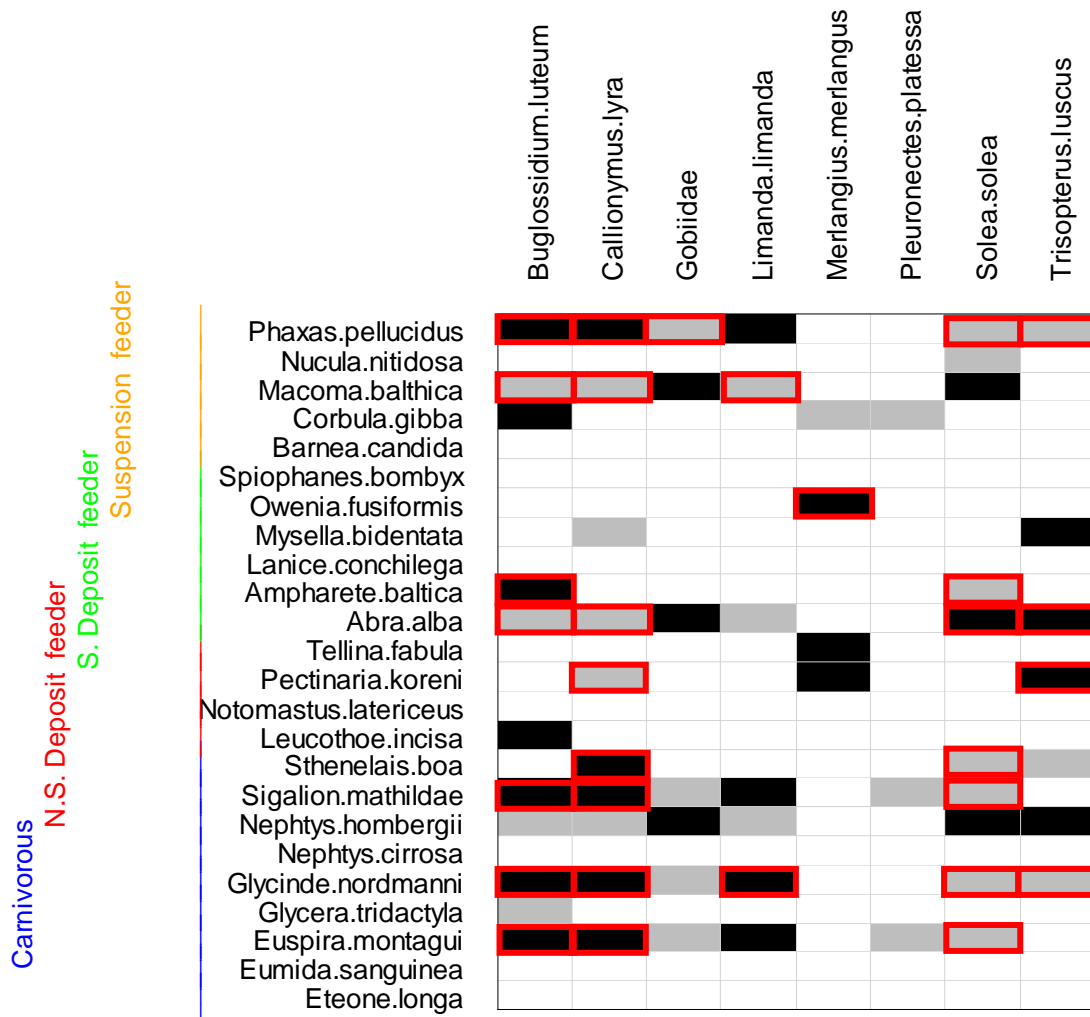
**Figure 73.** Distributions spatiales des quantiles de densités pour les soles G0, les plies G0 et les petites soles jaunes, au cours de la période 2008-2010.

#### 5.4. Couplage benthos-poissons à partir de données historiques (Analyse détaillée en annexe 6)

La section précédente portant sur la distribution spatiale et temporelle des poissons a clairement montré une certaine variabilité dans le temps et l'espace. La section sur le couplage benthos-poisson tente d'expliquer, d'un point de vue trophique et par l'intermédiaire de corrélations statistiques une partie de cette variabilité spatiale des poissons.

Une méthode de couplage de deux tableaux de données à patrons d'échantillonnage spatial différents a été mise en place pour l'analyse du couplage spatio-temporel des communautés de poissons et de benthos à partir des données historiques. Cette méthode est basée sur l'analyse 4ème coin (Brind'Amour et al., 2011; Dray, 2002; Dray & Legendre, 2008; Legendre et al., 1997) où les tableaux biologiques (poissons et benthos) sont mis en relation par l'intermédiaire d'une matrice de voisinage correspondant à l'intersection des surface d'échantillonnage des deux jeux de données (i.e. tenant compte des différences de patrons spatiaux d'échantillonnage).

Le couplage spatial a été réalisé entre les communautés de poissons benthodémersaux et leurs proies macrobenthiques potentielles, à partir de deux bases de données : une base de données « poissons » issue des campagnes annuelles de chalutage (automne 1995-2002) et une base de données « benthos » issue des campagnes d'échantillonnage réalisées à des saisons différentes et dans des secteurs variables. Dans les faits, l'application de la méthode s'est effectuée sur une période de deux années (1996 et 2001). Ces années ont été sélectionnées car elles permettaient une bonne superposition des zones prospectées et par conséquent de réaliser un couplage spatial sur l'ensemble de la baie de Seine. Un exemple des résultats du couplage poissons – benthos obtenu par cette méthode est présenté (Figure 74).



**Figure 74.** Tableau des corrélations entre espèces de poissons (colonnes) et espèces de benthos (lignes) (noir : corrélation positive significative ; gris : corrélation négative significative). En rouge sont les corrélations persistantes dans le temps.

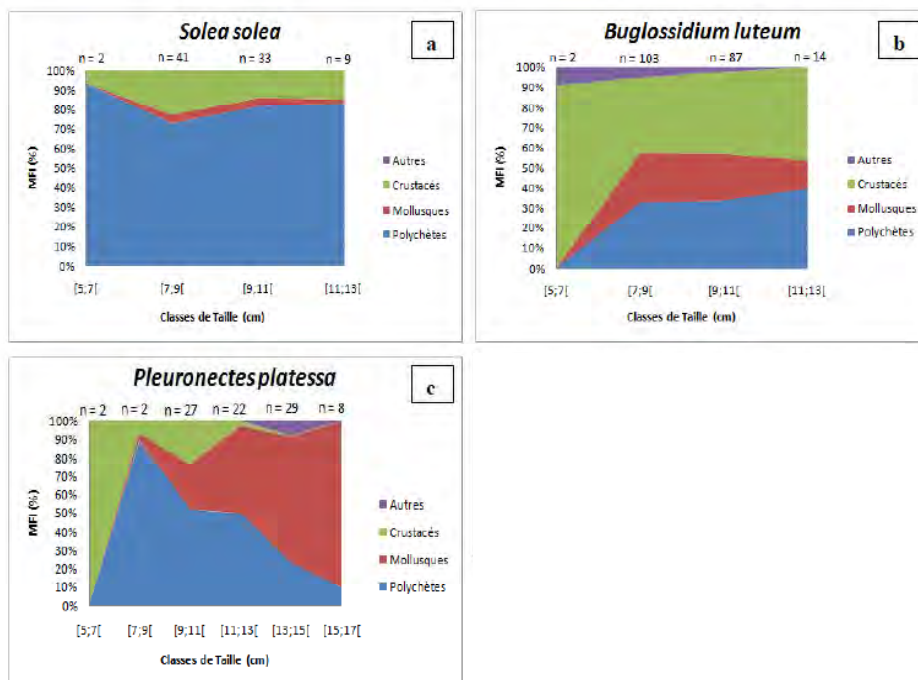
Les résultats montrent des relations spatiales significatives entre le benthos et les assemblages de poissons pour chacune des deux années, 1996 et 2001, ainsi qu'un gradient intérieur/extérieur estuaire au niveau des communautés. Bien que seulement deux années aient été étudiées, le nombre des relations significatives et surtout positives entre les poissons et leurs proies potentielles est supérieur en 2001 (année humide) en comparaison à 1996 (année plutôt sèche). Il semble exister une certaine persistance temporelle dans les corrélations prédateurs-proies suggérant ainsi une préférence des prédateurs pour certaines espèces proies benthiques (rectangles rouges, Figure 74; voir détail dans Durieux et al. 2010).

### 5.5. Analyse du fonctionnement et des relations trophiques

#### *Relations de compétitions entre trois espèces de poissons plats (Analyse détaillée en annexe 7)*

Cette section porte sur le fonctionnement et les relations trophiques entre les espèces. Elle a pour but d'étudier, voire même de confirmer, les relations prédateurs-proies mises en évidence dans la section précédente. En effet, alors que l'étude sur le couplage proposait une certaine persistance temporelle en termes de corrélations spatiales entre les poissons et proies potentielles, cette section-ci se base sur des marqueurs naturels (contenus digestifs, isotopes et otolithes) pour estimer les relations inter-espèces. Un focus a été mis sur les trois principales espèces de poissons plats (sole, plie, solenette).

Le régime alimentaire de trois espèces de poissons plats, *Solea solea*, *Buglossidium luteum* (Soleidae) et *Pleuronectes platessa* (Pleuronectidae), a été étudié afin d'observer le partage des ressources alimentaires entre ces espèces dans les aires de nurseries de la baie et de l'estuaire de Seine. Ces trois espèces présentent une similarité dans leur régime alimentaire (annélides polychètes, mollusques et crustacés) tout en présentant certaines préférences respectives (Figure 75; Tous Rius, 2009).



**Figure 75.** Variations des MFI (indice de préférence alimentaire) par classe de tailles de poissons. Analyses basées sur les contenus stomacaux de a) *Solea solea*, b) *Buglossidium luteum* et c) *Pleuronectes platessa*. Figure issue du rapport de stage de Tous Rius (2009).

Bien que les trois espèces de poissons plats étudiées consomment préférentiellement les mêmes catégories de proies, les largeurs de leurs niches alimentaires (calculée à partir de l'indice de diversité Shannon-Wiener,  $H$ ) à l'échelle de la baie de Seine diffèrent. En effet, la niche alimentaire de *Buglossidium luteum* est plus large ( $H=93,3$ ) que celle de *Solea solea* ( $H=45,7$ ) et de *Pleuronectes platessa* ( $H=23,4$ ). Le régime alimentaire de *B. luteum* est beaucoup plus diversifié que celui des deux autres espèces. D'un point de vue spatial, la largeur des niches alimentaires semble être plus grande sur les stations situées en aval (sonde des 5-10 m) en comparaison aux stations situées en amont (sonde inférieure à 5 m) de l'estuaire. Une analyse poussée des relations de compétition entre les trois espèces a permis de suggérer que bien que la sole et la plie semblent montrer un chevauchement alimentaire plus important qu'avec la solenette, la rythmicité de leur alimentation atténue la compétition potentielle entre les deux espèces.

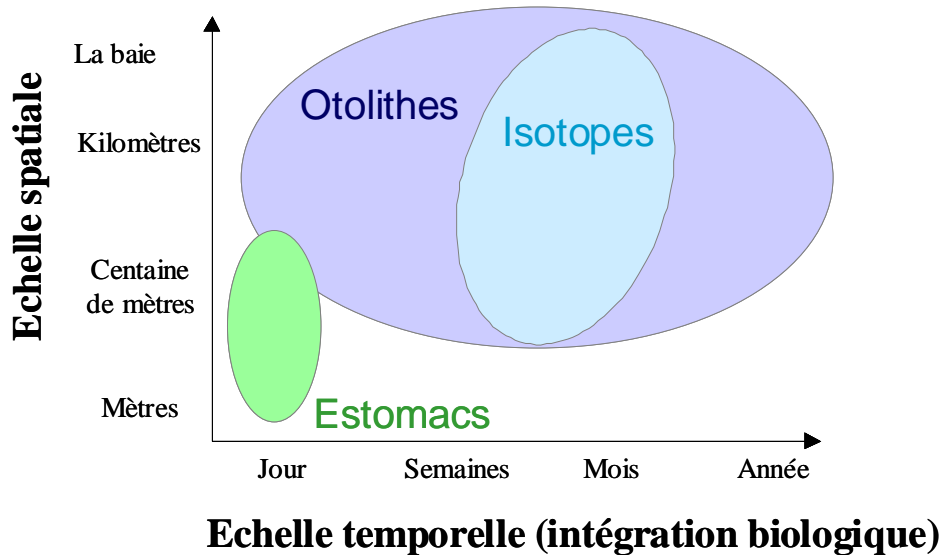
*Caractérisation spatiale des habitats de trois espèces de poissons plats via la combinaison de marqueurs naturels* (Analyse détaillée en annexe 8)

D'ordinaire, la description des habitats d'une ou plusieurs espèces est effectuée en utilisant les données d'abondance ou de présence-absence prélevées sur des stations d'échantillonnage. L'abondance, dans ce contexte représente une vision instantanée et donc l'habitat "potentiel" qu'utilisent les individus d'une ou des espèces pêchées. Afin de définir l'habitat "réalisé" d'une espèce nous avons utilisé des marqueurs naturels intégrant des informations sur une plus grande période de la vie des individus que la vision instantanée de l'abondance des captures. Les marqueurs naturels sont des caractéristiques micro-chimiques et biologiques des organismes acquises au cours du temps et spécifiques à des zones géographiques délimitées. Ils permettent ainsi de reconstruire les mouvements des individus. Ces marqueurs sont souvent utilisés à grande échelle spatiale pour estimer des connectivités inter-zones, ils peuvent aussi, comme ce fut le cas dans Colmatage, l'être à plus petite échelle spatiale au sein d'une même zone pour affiner les connaissances sur l'utilisation d'un même ou différents habitats.

Dans cette étude s'appuyant sur des données de marqueurs naturels (microchimie des otolithes, contenus digestifs, isotopes stables  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$ ) collectées en 2008 sur la nourricerie de l'estuaire de la Seine, il a été développé et testé une méthodologie nouvelle et originale permettant de caractériser l'habitat des juvéniles de trois espèces de poissons plats (*Solea solea*, *Pleuronectes platessa* et *Buglossidium luteum*). Chacun de ces marqueurs



possède ses propres limites en termes de résolution spatio-temporelle. Ces limites sont liées aux échelles d'intégration biologique des marqueurs et couvrent un gradient d'échelles temporelles (Figure 76).



**Figure 76.** Schéma représentant l'intégration spatiale et temporelle des trois marqueurs naturels utilisés dans cette section.

Les trois marqueurs ont fait l'objet d'une part, d'une analyse individuelle afin de vérifier l'existence d'une variabilité entre les trois espèces et d'une variabilité dans la distribution spatiale de ces dernières et d'autre part d'une analyse combinée pour en ressortir une distribution d'habitats intégrant l'histoire de vie des individus de chaque espèce.

### *Contenus digestifs*

Les trois espèces sont des poissons necto-benthiques qui présentent de fortes abondances dans l'estuaire de Seine, un régime alimentaire basé sur le benthos endogé et leurs juvéniles partagent la même zone de nourricerie. La solenette *Buglossidium luteum* et la sole commune *Solea solea* sont toutes deux de la famille des Soleidae et ont un rythme et un régime alimentaire similaire (De Groot 1971). La présence des juvéniles de ces trois espèces dans la même zone de nourricerie pourrait conduire, dans un contexte de limitation de la ressource benthique, à une compétition interspécifique au cours de cette phase critique de leur cycle de vie (Darnaude et al. 2001). L'ensemble de la section précédente, portant sur le régime alimentaire des trois espèces et les résultats du stage de Tous Rius (2009), montrent bien qu'il

existe une variabilité inter-espèce et une variabilité spatiale dans les contenus digestifs des trois espèces de poissons plats.

### *Marqueurs isotopiques*

L'ensemble des échantillons de poissons des trois espèces de poissons plats (sole, plie, solenette) a fait l'objet d'un prélèvement de muscle dorsal, puis d'une préparation (lyophilisation, broyage, pesée et encapsulage) pour les analyses isotopiques (réalisées en sous-traitance par le laboratoire SINLAB, University du New Brunswick). Les résultats montrent tout d'abord une relativement bonne discrimination des signatures isotopiques sur le  $\delta^{13}\text{C}$  et le  $\delta^{15}\text{N}$  entre les trois espèces (Figure 77). On note cependant une plus grande variabilité des signatures pour les juvéniles de sole et de plie avec un certain chevauchement entre ces deux espèces à la fois au niveau du  $\delta^{13}\text{C}$  et le  $\delta^{15}\text{N}$ . Les *Buglossidium luteum* se détachent particulièrement bien de par leur enrichissement en  $\delta^{15}\text{N}$  du fait que ce sont des individus plus âgés et leur enrichissement en  $\delta^{13}\text{C}$  du fait de leur distribution marine par rapport au deux autres espèces. Ces résultats corroborent de manière générale ceux obtenus en terme de régime alimentaire basés sur les contenus stomacaux (section précédente).

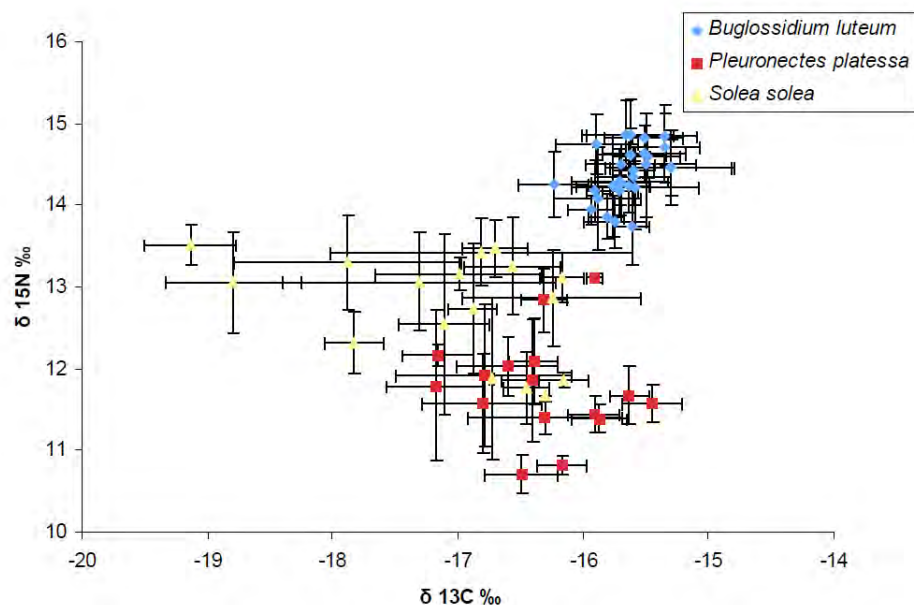
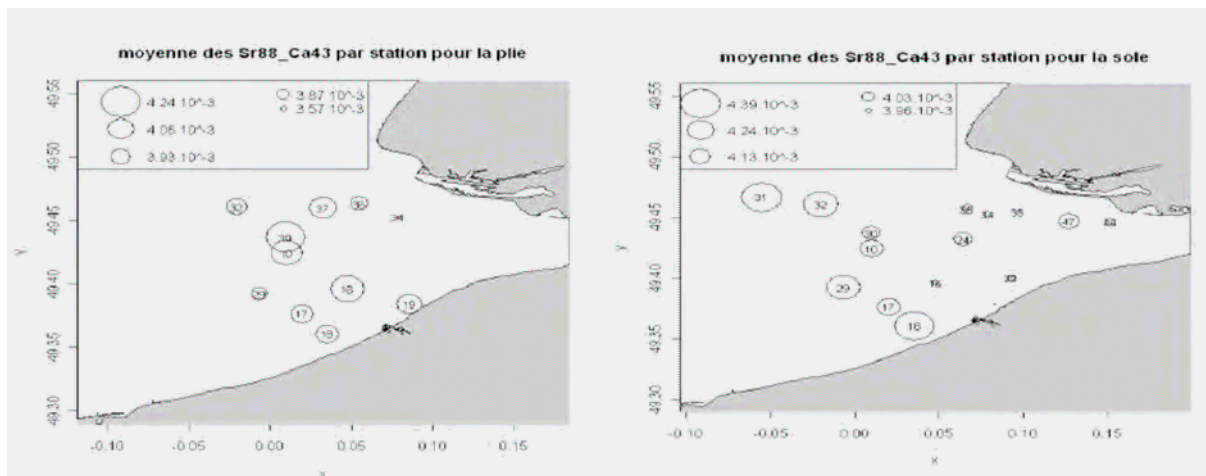


Figure 77. Moyennes ( $\pm$ SD) des signatures en  $\delta^{13}\text{C}$  et le  $\delta^{15}\text{N}$  pour les trois espèces de poissons plats (*Solea solea*, *Pleuronectes platessa* et *Buglossidium luteum*) suivant les différentes stations échantillonnées en estuaire de Seine en septembre 2008

### *Microchimie des otolithes*

La microchimie des otolithes (analyse multi-élémentaire des otolithes de sole et plie par ICP-MS en solution) a été effectuée sur l'ICP-MS (Thermo, Element 2) de l'IUEM (Université de Bretagne Occidentale) sur les otolithes de sole et de plie. Tous les éléments chimiques mesurés dans les otolithes de ces espèces, à l'exception du Mn55 montrent des différences significatives entre les deux espèces (test de wilcoxon p valeur  $> 0,05$  pour le Mn55). En effet, les concentrations de Ba135 et K39 sont plus élevées en moyenne chez la plie que chez la sole alors que les concentrations des autres éléments (sauf Mn55) montrent un effet inverse. Un exemple de différence de distribution spatiale des concentrations de Sr88/Ca43 est présenté pour les deux espèces (Figure 78). Ces graphiques montrent un gradient estuaire-large correspondant à un gradient de salinité. En effet, le rapport Sr88/Ca43 est un bon indicateur de la salinité du milieu.

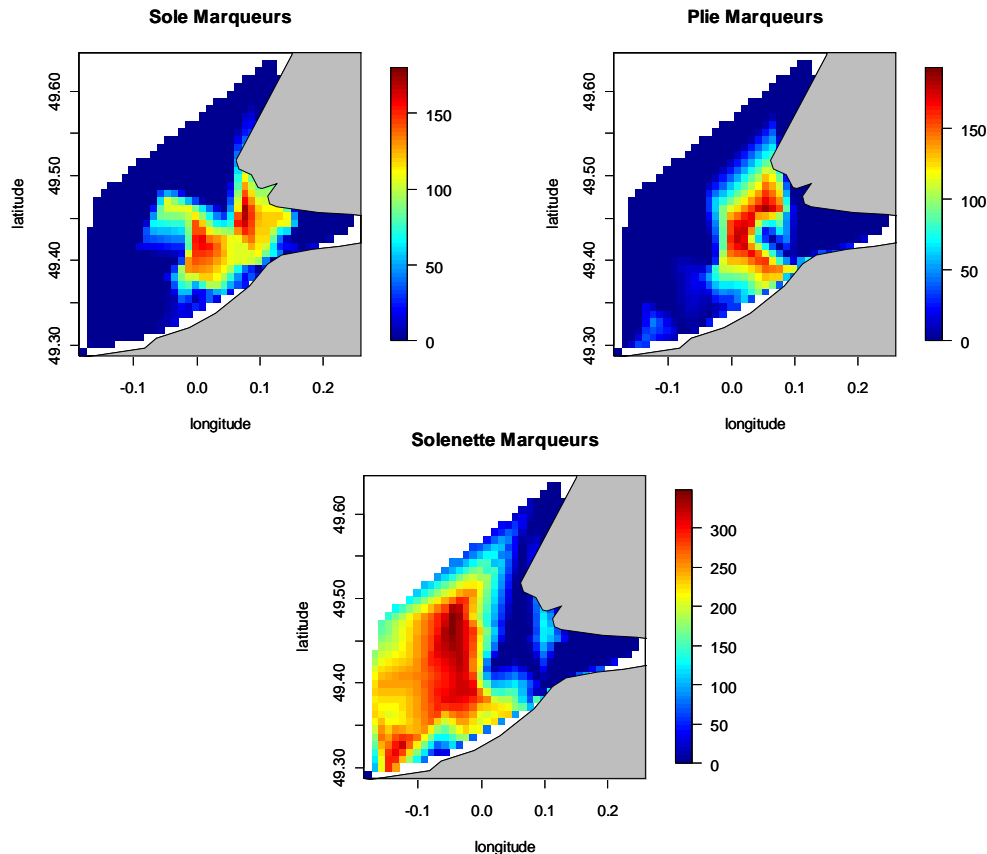


**Figure 78.** Cartes de distribution spatiale des concentrations moyennes (bulles) du rapport strontium sur calcium (Sr88/Ca43) pour la plie (gauche) et la sole (droite).

### *Combinaisons des trois marqueurs*

Les résultats des analyses individuelles de chaque marqueur indiquent qu'il existe une variabilité spatiale et inter-espèce pour chacun d'eux. La combinaison des trois marqueurs a permis de cartographier et d'estimer les habitats que les poissons ont potentiellement habité dans les trois derniers mois de leur vie, c'est-à-dire depuis leur arrivée sur les nourriceries pour les juvéniles (Figure 79). La distribution spatiale des juvéniles de sole est fortement associée à l'estuaire avec deux noyaux importants. L'intrusion estuarienne y est beaucoup plus marquée que pour les juvéniles de plie qui semblent séjourner davantage à l'embouchure de

l'estuaire. La combinaison des marqueurs pour les solenettes montrent que ces dernières passent une grande partie de leur vie loin de l'estuaire, dans la section bien marine de la baie. Ces résultats se rapprochent des cartes de distribution spatiale basées sur les abondances des espèces (Figure 73). Toutefois, la distribution des poissons estimée à partir des marqueurs est faiblement corrélée avec celle des abondances (coefficient de Spearman moyen pour les trois espèces:  $r = \sim 0,30$ ), suggérant ainsi que l'approche basée sur les marqueurs apporte tout de même des informations supplémentaires sur l'utilisation des habitats des espèces.



**Figure 79.** Distribution spatiale des trois espèces de poissons plats basée sur l'analyse des trois marqueurs. La représentation graphique est un krigeage (modèle linéaire) des coefficients de préférence des espèces. La légende indique le coefficient issu de l'analyse des trois marqueurs: du rouge (zones fortement préférées par l'espèce) au bleu (absence de cette espèce).

## 5.6. Conclusion

Les estuaires sont reconnus pour être des écotones riches, productifs et peu étendus qu'il est nécessaire de préserver. Parmi ceux-ci, l'estuaire de Seine a subi de profondes modifications bio-sédimentaires liées sans aucun doute à des facteurs naturels et anthropiques. Pour parvenir à l'amélioration, voire la restitution, des fonctionnalités écologiques de l'estuaire, il est

nécessaire de caractériser ces habitats de nourricerie, d'identifier les peuplements de poissons qui en dépendent et de définir une typologie de ces habitats. Tels étaient les objectifs de la partie halieutique du projet Colmatage.

Les résultats du compartiment halieutique montrent une certaine variabilité spatio-temporelle des abondances de plusieurs espèces de poissons de la baie de Seine et notamment des juvéniles de poissons plats. Parallèlement à la variabilité des abondances individuelles les résultats indiquent toutefois une certaine stabilité en terme de structure des communautés piscicoles (i.e. composition en espèce, diversité, structure en tailles...) et de distribution spatio-temporelle. Ainsi la composition en espèce demeure similaire d'une année à l'autre et se distribue avec une certaine persistance dans le temps mais les indices d'abondance eux varient dans le temps. De la même manière l'étude de la concomitance des patrons de distributions spatio-temporels des poissons et de leurs proies potentielles montrent aussi une certaine stabilité temporelle et spatiale mais avec des variations que l'on peut probablement associer aux conditions environnementales, voire même aux apports terrigènes de l'estuaire de la Seine, comme c'est actuellement le cas dans d'autres secteurs côtiers (Kostecki et al. 2010 ; Le Pape et al, soumis ; Kopp et al., soumis).

Les analyses issues des marqueurs naturels ont permis de caractériser les relations interspécifiques entre deux espèces commercialement importantes en Manche (Sole et Plie) et une espèce fortement abondante en baie de Seine (solenette). Les proies potentielles et préférentielles de ces deux espèces sont fortement similaires mais leur rythme d'alimentation permet d'atténuer le chevauchement des dimensions de leur niche fonctionnelle alimentaire. Les similarités alimentaires et spatiales de la plie et de la sole ont notamment été confirmées via l'analyse des contenus stomacaux et des isotopes stables. La distribution spatiale de ces trois espèces basée sur la combinaison des marqueurs est une analyse originale qui permet non seulement de caractériser l'habitat réalisé des espèces mais aussi de proposer une méthodologie unique (à notre connaissance) pour appréhender la typologie des habitats de poissons estuariens-côtiers basées sur l'histoire de vie des individus.

## **6. Etude de la variabilité spatiale et tidale des assemblages piscicoles dans les systèmes de filandre de l'estuaire aval - Années 2008 et 2009**

Les vasières intertidales de l'estuaire de la Seine sont assujetties à la dynamique générale de comblement de l'estuaire (Delsinne, 2005). Dans ce contexte, les chenaux de marée intertidaux dénommés localement 'filandres' se sont formés consécutivement à la sédimentation et au développement de la végétation. Les travaux récents montrent que ces habitats sont colonisés par l'ichtyofaune, certaines espèces y étant très abondantes au stade juvénile. La variabilité de la composition du peuplement intra-filandre est à relier principalement aux gradients de salinité. Les principaux objectifs de cette action d'abord intégrées de 2007 à 2009 dans COLMATAGE sont 1) de définir une typologie des habitats de filandres dans l'estuaire aval 2) d'affiner les connaissances sur l'organisation spatiale des poissons en abordant la variabilité intra-filandre. Cette action filandre a ensuite été poursuivie dans le projet DEFHFIS (Dynamique des Ecosystèmes et Fonctionnement Hydromorphologique des Filandres en Seine). Le rapport complet de cette action menée par la CSLN est donnée en annexe. Seuls quelques points marquants sont intégrés dans ce rapport de synthèse COLMATAGE.

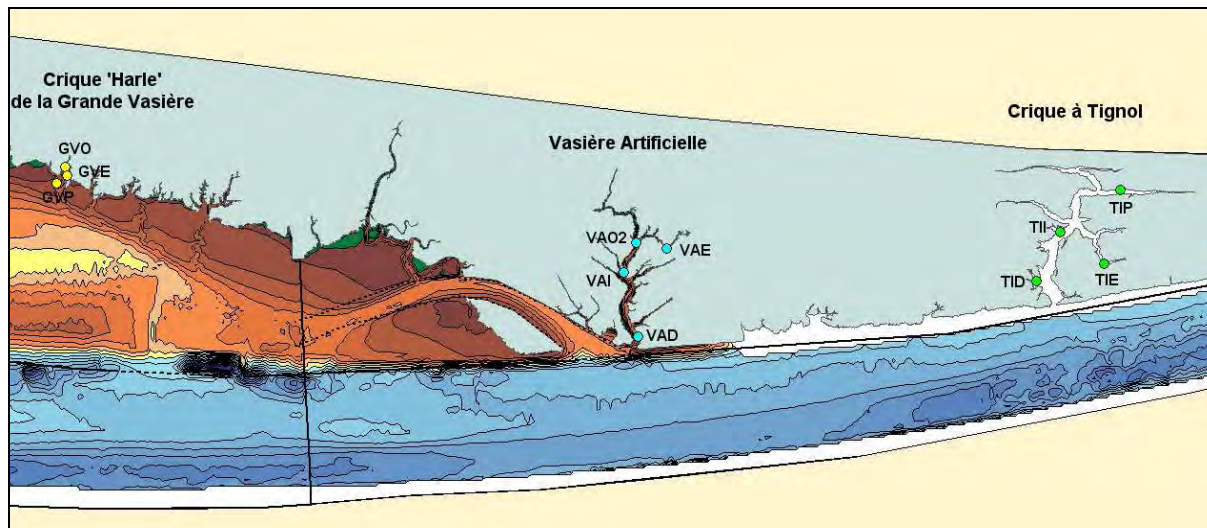
Les chenaux de marée intertidaux sont des milieux difficiles à échantillonner sur le plan ichtyologique en raison des contraintes d'accès, mais aussi des techniques de pêche à mettre en œuvre pour produire des résultats qui soient aussi représentatifs que possible du peuplement. C'est pourquoi les travaux effectués jusqu'à présent se rapportent uniquement aux fonds de chenaux, généralement de moindre profondeur et largeur.

### **6.1. Travaux menés en 2008**

En 2008, l'objectif principal était d'étudier la variabilité spatiale des assemblages ichtyologiques pour différents systèmes de filandres selon leur localisation le long du gradient longitudinal de l'estuaire de Seine et leur morphologie, et à l'intérieur de chaque système de filandre depuis l'entrée jusqu'au fond du système. Il s'agit également de vérifier si les assemblages d'espèces dépendent du niveau de ramification des filandres.

**A l'échelle intra-site**, l'échantillonnage simultané sur plusieurs stations réparties depuis le débouché jusqu'au fond de filandre de chaque site a permis d'étudier l'organisation spatiale des assemblages piscicoles selon le double gradient halin et bathymétrique interne à chaque

site (Figure 80). Les levés hydrologiques réalisés depuis le débouché jusqu'au fond de la filandre à pleine mer montrent l'existence d'une stratification haline et d'un gradient halin aval/amont marqués sur la Vasière Artificielle et la Crique à Tignol ; en effet, ces systèmes passent du domaine polyhalin (voire mésohalin sur la Crique à Tignol) au débouché au domaine oligohalin en fond de filandre, alors que la totalité de la filandre est classée en domaine polyhalin sur la filandre Harle en vive-eau. Sur le plan piscicole, une organisation des assemblages faunistiques est observée depuis l'aval du système vers son pôle amont. Au travers de la richesse taxonomique, elle s'exprime de manière différenciée sur la Crique à Tignol. Alors qu'un gradient croissant de richesse taxonomique est relevé d'amont en aval sur les deux sites les plus aval, ce gradient tend à s'inverser sur la Crique à Tignol, les petits fonds de cette filandre présentant les valeurs les plus fortes.



**Figure 80.** Localisation des stations de pêche prospectées à partir d'engins fixes en 2008 dans les chenaux intertidaux de la rive nord de l'estuaire de la Seine, dans le cadre du projet COLMATAGE.

Au travers des abondances numériques, les espèces tendent à s'organiser de manière différenciée le long du gradient entrée/fond de filandre ; ce schéma se retrouve de manière similaire sur les trois sites étudiés malgré des configurations et des caractéristiques halines différentes. Ainsi les gobiidés restent concentrés au débouché du système et présentent un gradient décroissant vers le fond de filandre ; une répartition inverse est observée pour le bar et le mullet porc. Il est possible que cette organisation différenciée du peuplement soit liée aux capacités natatoires des juvéniles de poissons, c'est-à-dire à leur vitesse de nage ; le bar et le mullet porc pourraient alors gagner les secteurs de fond de filandre tandis que les gobies

resteraient au niveau du débouché. Le flet et l'anguille sont essentiellement capturés au débouché de la filandre ; cela correspond en fait à des individus de grande taille, souvent au stade adulte. Les résultats obtenus sur les différents sites amènent à penser que les niveaux d'abondance ne sont pas proportionnels avec l'ampleur du bassin versant de la filandre ou de la ramification de la filandre étudiée. En attestent les CPUE plus fortes sur GVE comparativement à GVP dont le bassin versant est plus grand. En analysant la structuration en taille des espèces principales capturées (bar, mulot porc), il apparaît que les captures des plus gros individus se rapportent aux stations les plus profondes de l'entrée de la filandre, tandis que les pôles amont sont principalement colonisés par les stades les plus jeunes pour le bar et le mulot porc. La configuration de la filandre, et notamment sa topographie, structure donc fortement la répartition spatiale en taille des espèces.

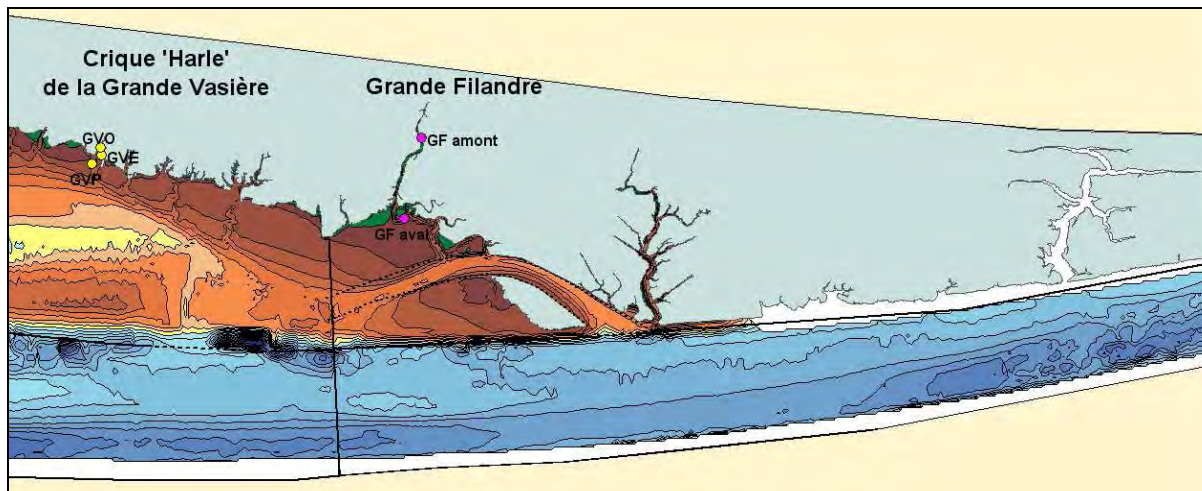
**A l'échelle inter-site**, l'étude de trois systèmes de filandres situés en rive droite le long du gradient longitudinal de salinité de l'estuaire de la Seine a montré que la salinité était un paramètre extrêmement structurant des assemblages piscicoles, même si ce sont généralement les trois mêmes taxons (gobiidés, bar, mulot porc) qui dominent en effectifs sur les trois sites. Le peuplement piscicole de la filandre Harle de la Grande Vasière située intégralement en domaine polyhalin s'oppose à celui de la Vasière Artificielle et de la Crique à Tignol situées plus en amont en connexion directe avec le chenal de la Seine ; il est largement dominé par le bar alors que ce sont les gobiidés sur les deux filandres plus amont, le mulot porc apparaissant en 3<sup>ème</sup> position sur les trois sites. Certaines espèces se révèlent caractéristiques de systèmes de filandre en situation automnale lors des vives-eaux : ce sont le hareng et le prêtre pour la Grande Vasière, et l'éperlan et l'épinoche pour la Crique à Tignol. Le bar et le flet présentent des CPUE numériques moyennes décroissantes depuis le site aval vers le site amont, tandis que les gobiidés sont nettement plus abondants sur la Vasière Artificielle et que le mulot porc présente une répartition indifférenciée entre les trois sites. Les espèces dulçaquicoles contribuent de manière plus importante à la richesse taxonomique sur le site le plus amont (Crique à Tignol).

En résumé, l'analyse de l'organisation spatiale des assemblages piscicoles réalisée à l'automne 2008 met en évidence l'existence de deux paramètres majeurs dans la structuration spatiale : la salinité et la morphologie indicatrice de la colonne d'eau disponible. Néanmoins le schéma observé ne reflète que des conditions automnales de vive-eau ; il reste à préciser si cette organisation était transposable dans d'autres conditions de marée, qui influencent sur les caractéristiques halines et la hauteur d'eau disponible au sein de ces habitats.



## 6.2. Travaux menés en 2009

L'année 2009 du projet COLMATAGE a été consacrée à l'étude de la cinétique tidale des assemblages piscicoles en condition automnale lors d'un cycle de marée de 15 jours sur deux stations de la filandre Harle de la Grande Vasière et de la Grande Filandre (Figure 81).



**Figure 81.** Localisation des stations de pêche prospectées à partir d'engins fixes en 2009 dans les chenaux intertidaux de la rive nord de l'estuaire de la Seine, dans le cadre du projet COLMATAGE.

**A l'échelle inter-site,** l'étude de deux systèmes de filandres situés en rive droite le long du gradient longitudinal de salinité de l'estuaire de la Seine confirme le rôle de la salinité en tant que paramètre structurant des assemblages piscicoles, déjà identifié lors de l'étude spatiale menée en 2008. Sur le plan hydrologique, la filandre Harle se situe intégralement en domaine polyhalin et sous l'influence de la masse d'eau pénétrant à l'intérieur de la fosse nord à la faveur du flot. La Grande Filandre est localisée plus en amont de l'estuaire et, bien que présentant des valeurs de salinité nettement inférieures à celles de la Filandre Harle, se situe généralement en domaine polyhalin jusqu'en fond de filandre, hormis lors de la morte-eau du 25/09 où la moitié de la filandre appartient au domaine mésohalin. Sur le plan piscicole, les assemblages ichtyologiques rencontrés sur les deux sites restent similaires, avec la dominance en effectifs du bar, des gobiidés (juvéniles et gobie tacheté) et du mulot porc.

**A l'échelle intra-site,** l'échantillonnage simultané sur plusieurs stations réparties depuis le débouché jusqu'en fond de filandre (stations Aval et Amont de la Grande Filandre) ainsi que sur les différentes ramifications de la filandre (bras principal GVP et secondaires GVO et

GVE de la filandre Harle) permet d'appréhender la variabilité spatiale interne. Sur le plan hydrologique, la réalisation de radiales depuis l'entrée vers le fond de filandre permet de mettre en évidence en condition automnale l'existence d'un gradient décroissant de température ; ce gradient thermique est doublé d'un gradient halin également décroissant vers le fond de filandre plus marqué sur la Grande Filandre que sur la filandre Harle, ce qui illustre la mixité des masses d'eau (fluviale et marine) pénétrant à la faveur du flot dans le méandre. Sur le plan piscicole, les caractéristiques morphologiques et halines des stations échantillonnées induisent une certaine variabilité au sein des assemblages ichtyologiques qui reste néanmoins moins forte que la variabilité inter-site. L'organisation spatiale différenciée observée en 2008 est à nouveau identifiée au travers de la composition et de la structuration du peuplement en 2009. Les stations situées au débouché de la filandre ou dans le bras principal présentent généralement des niveaux de richesse taxonomique supérieurs. Ainsi le syngnathe perçat, les juvéniles de clupéidés, l'épinoche de mer et le gobie buhotte ne sont recensés que sur la station GVP de la filandre Harle tandis que ce sont le hareng, la limace de mer, la motelle à 5 barbillons et le flet à l'entrée de la Grande Filandre. La morphologie (bathymétrie) et la configuration (bras principal / secondaire, bassin versant) des bras de filandres échantillonnés intervient également ; ainsi la station GVO située sur un petit bras secondaire de la filandre Harle présente une richesse taxonomique inférieure à celle de la station GVE dont le bras de filandre est plus important et plus profond. Sur la filandre Harle, les niveaux d'abondance sont également plus élevés sur la station la plus proche du débouché (GVP), principalement du fait du bar, des gobiidés (juvéniles, gobies buhotte et tacheté) et des juvéniles de mugilidés. Comme en 2008, les gobiidés restent mieux représentés à proximité du débouché de la filandre, et les mugilidés en fond de filandre. Sur le plan pondéral, les plus fortes CPUE sont aussi associées au bras principal sur la filandre Harle au travers de la capture d'adultes de mulot porc, de bar, de flet et d'anguille ; ce constat est probablement à rapporter au gradient bathymétrique caractérisant les filandres. En revanche, l'organisation spatiale du peuplement piscicole apparaît moins reproductible au cours d'un cycle de marée sur la Grande Filandre.

**Sur le plan temporel**, la répétition de séquences de pêche en condition de jusant au cours d'un cycle de marée de 15 jours permet d'appréhender la variabilité liée au coefficient de marée sur le peuplement piscicole fréquentant les deux sites. Cinq à six journées d'échantillonnages ont été réalisées sur chacune des deux filandres pour des coefficients de marée compris entre 34 et 93 sur la filandre Harle et entre 47 et 88 sur la Grande Filandre.

Sur le plan de la richesse taxonomique, la composition du peuplement apparaît fortement structurée par le cycle tidal morte-eau / vive-eau (ME/VE), avec l'identification d'un schéma similaire sur les deux sites étudiés : la richesse taxonomique tend à diminuer avec le marnage, ceci étant relié principalement à la guildes des poissons marins. Plus l'influence marine est forte (marées de VE), plus les espèces marines fréquentant la filandre apparaissent diversifiées. Ainsi les juvéniles de clupéidés ne sont pas observés en morte-eau sur les stations internes de la filandre Harle ; c'est également le cas pour le syngnathe, le prêtre et le gobie buhotte sur la Grande Filandre. Les juvéniles de clupéidés et l'éperlan ne pénètrent sur la station Amont de la Grande Filandre qu'à la faveur des vives-eaux tandis que le hareng, la limace de mer et la motelle restent cantonnés sur la station Aval lors de ces marées. Cette variabilité tidale n'apparaît pas de manière aussi nette sur la station GVO.

Au travers des abondances numériques, un schéma similaire à celui de la richesse taxonomique est observé sur les stations les plus internes de la filandre Harle et sur la station Aval de la Grande Filandre : les CPUE sont maximales en vive-eau et diminuent en morte-eau, cette cinétique étant structurée par les effectifs de bar et de mulot porc sur les stations GVE et GVO, et par ceux de bar, d'éperlan et de gobiidés sur la station GF Aval. Au contraire, les CPUE s'avèrent maximales pour le marnage le plus réduit sur le bras principal de la filandre Harle, malgré une hauteur d'eau (50 cm environ à pleine-mer) et une séquence de pêche très réduite (15 min au lieu de 2h00 à 2h30 lors des autres marées) ; ce pic d'abondance est structuré par le bar, le mulot porc et les gobiidés. Cette observation indique que les espèces vont optimiser leur passage dans la filandre en morte-eau en se concentrant au niveau de son débouché, le temps de résidence et la zone accessible étant particulièrement réduits dans ces conditions de marée. L'absence d'échantillonnage validé sur les stations plus internes GVE et GVO ne permet pas de conclure sur le degré de pénétration des différentes espèces dans les bras secondaires lors de coefficients de marée aussi faibles. Une cinétique différente est observée sur la station Amont de la Grande Filandre dont les CPUE numériques sont maximales en début de période, c'est-à-dire en marées décroissantes, et minimales en fin de période, i.e. en marées croissantes ; cette évolution est structurée par le bar, les juvéniles de gobiidés et de mugilidés. Le même constat apparaît au travers des biomasses sur les deux sites avec des captures de mulot porc, bar, flet et anguille plus abondantes en début de période d'étude. Il reste difficile de déterminer quel paramètre est à l'origine de cette cinétique puisque le niveau de température, la direction et la force des vents (vents faibles de secteur Nord en début de période, puis vents plus forts de secteur Ouest) ainsi que les coefficients de marée fluctuent sur la même période.

Le premier constat concernant cette étude est que la variabilité est extrêmement forte sur ces systèmes que ce soit en termes de caractéristiques hydrologiques ou des assemblages piscicoles, à la fois sur le plan spatial et temporel. Si certaines modalités d'évolution ont pu être précisées soit sur le plan spatial (inter- et intra-filandre), soit sur celui de la cinétique tidale, cette étude ne peut prétendre répondre à toutes les questions concernant l'organisation du peuplement piscicole en lien avec des paramètres environnementaux eux-mêmes très variables sur ce genre de systèmes. Pour autant, les assemblages ichtyologiques ne varient pas fondamentalement d'un site à l'autre, à l'intérieur d'une même filandre, comme au cours d'un cycle tidal de 15 jours.

Néanmoins il ressort de cette approche :

- 1) que la bathymétrie constitue un paramètre structurant à la fois sur le plan spatial (à l'échelle intra- et inter-filandre) et temporel (volumes en eau selon l'heure et le coefficient de marée), notamment sur la filandre Harle ; elle structure notamment le degré de pénétration des phases adultes de certaines espèces de poissons (flet, mulot porc) ;
- 2) que le cycle tidal Morte-eau / Vive-eau influe fortement sur les niveaux d'abondance de l'ichtyofaune dans les filandres ; sur une majorité de stations, les indices d'abondance numérique tendent à augmenter avec le marnage. Néanmoins il reste une variabilité extrêmement forte pour des coefficients de marée similaires et les mortes-eaux les plus sévères ne sont pas toujours les plus défavorables, au contraire, à l'abondance de l'ichtyofaune ;
- 3) la fonctionnalité des filandres apparaît réduite en morte-eau du fait d'un temps d'accès plus court pour la faune circulante et de la réduction spatiale des zones de nourricerie latérales ;
- 4) le phasage de la vive-eau vers la morte-eau (marée décroissante) et de la morte-eau vers la vive-eau semble affecter les résultats relatifs à la faune piscicole même si cela reste à confirmer sur des séries d'échantillonnage plus longues afin de neutraliser l'influence d'autres paramètres environnementaux tels que les conditions météorologiques. Il est possible que l'appel trophique vis-à-vis de l'ichtyofaune généré par les filandres se mette en place en condition de vive-eau alors que le schorre et les fonds de filandres sont inondés et que les espèces fourrages qui les colonisent les hauts-niveaux soient emportés par la masse d'eau circulante ; cet appel perdure en perdant progressivement de son intensité en allant vers les mortes-eaux, mais ne se renouvelle que petit à petit de la morte-eau vers la vive-eau au fur et à mesure que les hauts niveaux sont recouverts par la marée.

## 7. Observations de la variabilité de l'environnement physique et recherche de liens avec la macro-faune benthique

### 7.1. Rappel des objectifs

L'anthropisation de l'estuaire de la Seine sur les trois dernières décennies a conduit à de profondes modifications morphologiques dont les principales conséquences ont été caractérisées : réduction globale du volume de l'estuaire, réduction des surfaces intertidales et migration vers l'aval de la sédimentation entraînant un envasement significatif de l'estuaire aval. Cette dynamique particulièrement complexe des sédiments fins a fait l'objet de nombreux travaux, parmi lesquels ceux : Avoine, 1980 ; Guezennec, 1999 ; Lesourd, 2000 ; Garnaud, 2003 ; Delsinne, 2005 ; Deloffre, 2005 ; Waeles, 2005 ; Cuvilliez, 2008.

Le projet COLMATAGE a notamment pour ambition de décrire la variabilité des habitats marins à l'embouchure de la Seine. Contribuant fortement à la définition de ces habitats, les biotopes peuvent se structurer en fonction de paramètres *morphologiques* (bathymétrie), *hydrodynamiques* (intensité des vagues et des courants, hauteurs d'eau) et *sédimentaires* (nature et compaction du substrat sur lesquelles les biocénoses peuvent avoir éventuellement une influence).

L'implication générale de ces paramètres est relativement connue, par contre, les études récentes au sein de Seine-Aval ont montré que leur distribution relative pouvait varier au gré des forçages physiques, plus souvent de manière événementielle que saisonnière. Notamment, ces études antérieures ont mis en évidence une forte variabilité de la couverture sédimentaire dans des échelles de temps qui restent à préciser : l'évolution est-elle saisonnière ou bien la variabilité est-elle contrôlée par les événements météo-océaniques, avec un temps de réponse court du système ? Dans le but de répondre à cette question et en s'appuyant sur le modèle hydro-sédimentaire élaboré dans le cadre du programme Seine-Aval 3 (en cours de validation avec le projet MODEL), il a été effectué :

- 1) parallèlement à l'analyse de la macrofaune réalisée par les benthologues sur des *prélèvements sédimentaires*, des *carottages courts* et *bennes* qui permettent de mesurer le comportement physique de divers types de faciès associés à des biocénoses distinctes ; ceci pour une éventuelle prise en compte des effets majeurs des organismes benthiques sur le comportement du sédiment et son éventuelle transformation

- 2) des *enregistrements en continu d'altimétrie* haute résolution du niveau de sédiment. Depuis de nombreuses années, cette technique s'est avérée très fructueuse pour un suivi continu efficace permettant de corréler les événements d'érosion/dépôt aux conditions de forçages. Un capteur de pression intégré au système permet de mesurer des spectres de vagues. Face à l'absence de mesures rendant compte de la variabilité à courte échelle de temps (quelques mois) des processus de dépôt/érosion dans des secteurs clés de bancs d'embouchure (Ratier, Amfard...) et dans la fosse Nord, les enregistrements en continu ont donc été privilégiés sur ces secteurs présentant un intérêt du point de vue de l'évolution saisonnière des habitats, entre septembre 2008 et mars 2009, ou juin 2009 pour l'une des stations. Dans certains cas, des turbidimètres en continu ont été installés sur les supports des altimètres ou à proximité, de façon à disposer au même endroit d'une information de forçage essentielle pour la faune benthique, la quantité de matière en suspension (MES).

Au sein du projet COLMATAGE, trois stations autonomes de mesures altimétriques ont été mises en œuvre avec des balisages spécifiques :

- à l'embouchure, en *domaine subtidal* : station « Bouée des Ratelets » et station « Triangle des épaves » et
- en *domaine intertidal* : station « Fosse Nord », sur la vasière adossée à la digue basse Nord.

Ces stations ont été complétées (2010 – 2011) par deux autres, en *domaine subtidal*, dans le cadre du projet MODEL de Seine-Aval 4 : stations « Bouée des Ratelets » et « Ratier Sud-Est », en fosse sud.

Pour plus de clarté dans la compréhension des phénomènes et d'homogénéité dans les analyses, nous avons choisi d'inclure les résultats de la totalité des stations dans ce rapport, qui de ce fait est un chapitre commun aux projets COLMATAGE et MODEL.

## 7.2. Actions réalisées

### Les moyens à la mer

Les carottages courts et bennes Shipeck ont été réalisés au moyen du navire N/O « Côtes de la Manche » de l'INSU. La réalisation des 3 mouillages des systèmes altimétriques Altus et leurs balisages en zone d'embouchure de la Seine : *Ratelets* (2 périodes), *Triangle des épaves* et

*Ratier SE* a été exécutée avec ce même navire. Le mouillage de la station *Fosse Nord* a été réalisé avec le zodiac et le concours de la Cellule de Suivi du Littoral Normand (CSLN).

Les campagnes à la mer pour la calibration des sondes turbidimétriques sur des cycles de marée de 12h ont été menées avec divers moyens nautiques, tels que : la vedette hydrographique « Maïmiti » du GPM de Rouen dans le chenal, le chalutier *Flipper* et la vedette *Eclat* de la CSLN pour la *Fosse Nord*.

### **Stratégie mise en œuvre pour la caractérisation physique des habitats**

Une campagne d'érodimétrie des sédiments fins de l'embouchure de la Seine a été conduite, de façon à caractériser les conditions de remobilisation des sédiments superficiels, sables fins ou vases, sous l'action d'une contrainte de cisaillement exercée par les courants ou par les vagues. En dehors d'une série d'essais réalisée il y a une dizaine d'années au cours d'une campagne « Vastedeba », et de quelques mesures faites à Brest sur des culots de tassements expérimentaux (Le Hir *et al.*, 2005), c'est la première fois qu'une campagne d'érodimétrie était réalisée dans le secteur d'embouchure de la Seine en quasi *in situ*. Mais dans le cadre du projet COLMATAGE, il s'agissait en plus d'examiner l'influence des organismes benthiques sur les conditions d'érosion des sédiments. L'échantillonnage adopté a été réalisé en concertation avec des benthologues (J.C. Dauvin et N Desroy), de façon à cibler des secteurs occupés ou non par des organismes susceptibles de changer le comportement à l'érosion des sédiments, et cela si possible pour différents faciès sédimentaires. Les faciès purement sableux ou graveleux étaient a priori écartés, dans la mesure où les conditions de remaniement des sédiments purement non cohésifs sont a priori connues (le cas des sables hétérométriques n'était pas pris en compte dans cette étude).

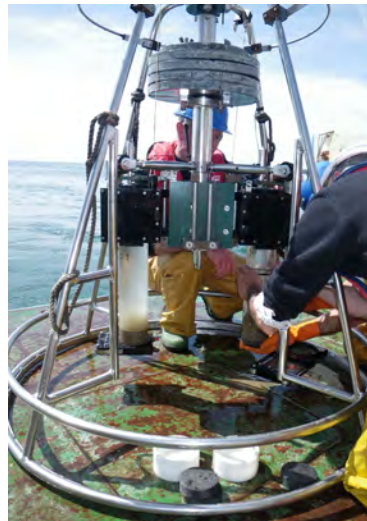
### **Réalisation des tests érodimétriques**

Les mesures réalisées à partir du canal érodimétrique Ifremer exigeaient d'être faites le plus rapidement possible après les carottages courts de la campagne de prélèvements sédimentaires (25-30 avril 2010). L'utilisation d'un local mis à disposition au sein de la CSLN du Havre a permis à l'équipe Ifremer de faire les tests érodimétriques au fur et à mesure des prélèvements (typiquement, le lendemain).

Les prélèvements eux-mêmes ont été réalisés avec un carottier préservant l'interface eau-sédiment (Figure 82). Le carottier multitubes « Bowers & Connelly », correctement lesté,

permet de prélever jusqu'à 4 carottes de 90 mm de diamètre avec une hauteur de sédiment maximum d'environ 30 cm et en préservant l'eau surnageante. Pour chaque station de prélèvement, une carotte est destinée à l'échantillonnage pour l'investigation des faciès et la détermination des paramètres sédimentologiques classiques : teneur en eau, concentration sèche du sédiment, spectres granulométriques et éventuellement test scissométrique.

Canal érodimétrique Ifremer, installé dans les locaux de la CSLHN



Carottier interface multitubes



Interface eau/sédiment d'une carotte avant passage dans le canal érodimètre

**Figure 82.** Les diverses opérations pour les études érodimétriques des sédiments carottés

Une autre carotte est découpée par tranches, successivement ; celles-ci sont soumises au test en canal érodimétrique. La fonction de cet *érodimètre* est de déterminer les seuils et flux d'érosion d'un sédiment fin vaseux à sablo-vaseux (Le Hir *et al.*, 2007). Le test consiste à soumettre l'échantillon non remanié à un courant forcé dans le canal. Un turbidimètre, en aval de la zone de test, contrôle la remise en suspension des particules fines tandis que les sables sont récupérés dans un piège. Le forçage est paramétré par la *contrainte de cisaillement* au niveau de l'interface eau-sédiment. L'érodabilité d'un sédiment apparaît donc caractérisée par un flux d'érosion (en masse ou volume/unités de temps et surface) que l'on cherche à exprimer en fonction de la contrainte hydrodynamique (courant ou vagues) et des caractéristiques du sédiment. Dans le cas où un seuil d'érosion est déterminé, il représente la valeur critique de la contrainte de cisaillement au-dessous de laquelle il n'y a pas d'entraînement du sédiment par le fluide.



Ce canal érodométrique permet donc en particulier de caractériser l'érosion de mélanges naturels vaseux à sableux.

### **Mesures altimétriques du niveau de sédiment**

Les mesures en continu des variations altimétriques (avec une précision de l'ordre de  $\pm 2$  mm) du niveau de sédiment ont été réalisées au moyen de systèmes ALTUS immergeables (Jestin *et al.*, 1998 ; Bassoullet *et al.*, 2000). Cette instrumentation autonome fonctionne sur le principe d'un échosondeur avec une fréquence d'émission d'ondes acoustiques de 2 MHz. Le transducteur, orienté vers le bas, est positionné à une trentaine de centimètres au-dessus du sédiment ; le module enregistreur/énergie est déporté. Le transducteur est placé au centre d'un trépied adapté afin de s'affranchir des phénomènes d'affouillements sous le transducteur, affouillements dus aux tiges d'ancrage dans le sédiment.

Le temps de trajet depuis l'émission de l'onde acoustique et sa réception par le transducteur est converti en distance, en tenant compte de la célérité du son qui dépend de la température et de la salinité du milieu.

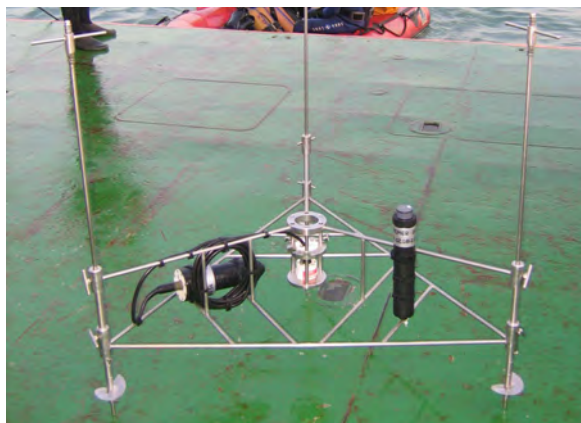
Le système ALTUS peut acquérir jusqu'à 4 seuils de détections d'énergie acoustique reçue. Ces seuils ont pour but d'améliorer la précision altimétrique de l'interface eau-sédiment ; ce sont des indicateurs de l'état de sédimentation/consolidation des dépôts. Le niveau maximum du signal acoustique reçu par le transducteur (« écho max. »), par rapport au signal émis, est également enregistré et donne la possibilité de valider ou non la mesure altimétrique. Un capteur de pression, intégré au module, permet de connaître la hauteur d'eau sur le site. Lorsque l'acquisition du signal de pression se fait à haute fréquence (typiquement 2 Hz), le traitement des données de pression permet de calculer les principaux paramètres caractéristiques des vagues (spectre d'énergie, fréquence de pic, hauteur significative, mais pas la direction...) : le système ALTUS fonctionne alors en mode « vagues » (Bassoullet *et al.*, 2010).

Les systèmes ALTUS des trois stations « Ratelets, Triangle des épaves et Ratier SE », situés en domaine subtidal, ont été placés par plongeurs (Figure 83). L'intervention est assez délicate, car les plongeurs doivent « visser » dans le sédiment 3 tiges inox sur une distance de l'ordre de 60 cm, et les mettre à niveau pour un positionnement bien vertical du transducteur acoustique, tout cela avec une visibilité quasi nulle. Lors des relèves intermédiaires, il était possible de récupérer les données enregistrées en utilisant un système de communication inductif, sans démontage du système ni connexion sous-marine.



Instrumentation de la station « Triangle des Epaves », le 09/10/2008 :

- Système ALTUS par plongeurs
- Balisage du site



**Figure 83.** Le système ALTUS : à gauche, le transducteur central relié au module enregistreur/énergie et un pinger ; à droite, détail.

### 7.3. Déroulement des opérations de 2008 à 2011

#### Les mesures altimétriques

Les mesures altimétriques ALTUS se sont déroulées sur 2 périodes :

- durant « COLMATAGE 1 », en 2008-2009 : Bouée des Ratelets et Triangle des épaves pour le domaine subtidal et en Fosse Nord, en domaine intertidal,

- durant « COLMATAGE 2 », en 2010-2011 : Bouée des Ratelets (même site que lors de COLMATAGE 1) et en Fosse Sud, en domaine subtidal également.

-

La motivation pour cette deuxième campagne de mesures résulte de la méconnaissance des processus sédimentaires dans la fosse sud, le besoin d'y observer les teneurs en matières en suspension (décrites dans le projet MODEL), et l'opportunité d'acquérir, au même endroit, des mesures d'érosions/dépôts des sédiments. L'emplacement du système de mesures (Ratier SE) correspond à une zone où les différentiels bathymétriques d'une part, et des calculs hydro-morpho-sédimentaires antérieurs d'autre part, révélaient des évolutions particulières (Waeles, 2005). De façon à pouvoir « raccrocher » de nouvelles mesures altimétriques à celles de la campagne de 2009, il a été décidé de renouveler la mesure des Ratelets, très représentative d'un secteur (flanc occidental du banc du Ratier) où la dynamique était importante, selon les mesures de 2009.

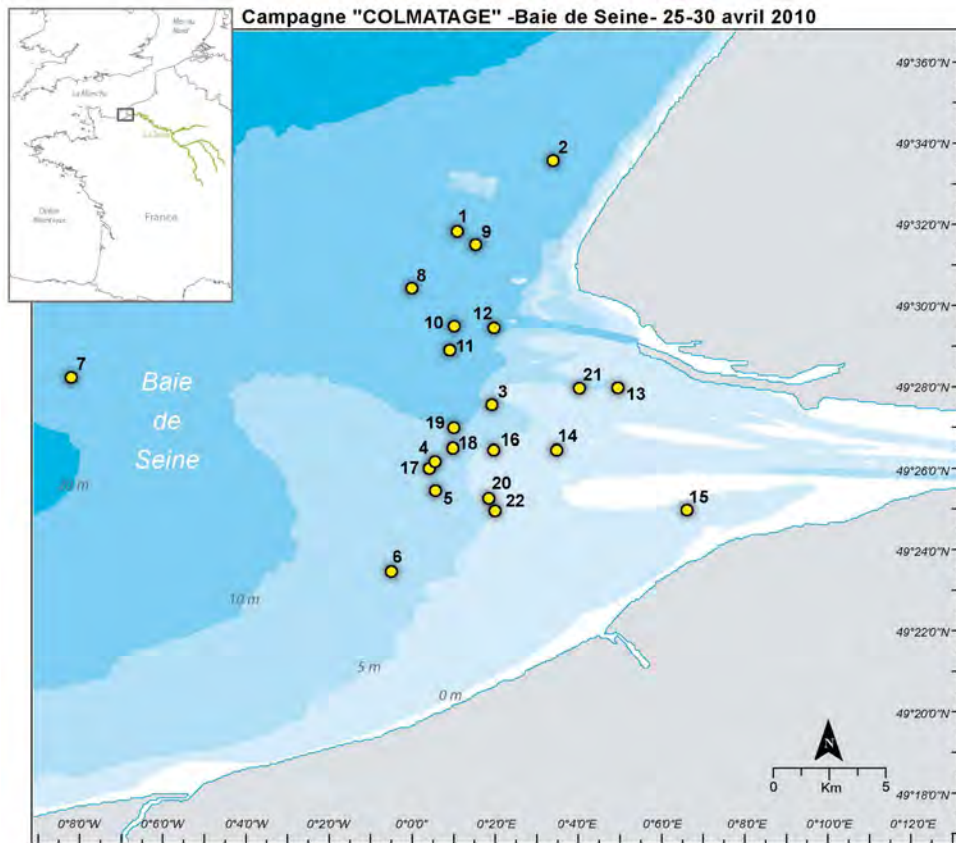
Parce que les deux projets, COLMATAGE d'une part, et MODEL d'autre part, s'intéressent à la variabilité des conditions de remaniements des sédiments superficiels, il est proposé de tenter une analyse des mesures altimétriques commune aux deux projets.

Les positionnements de ces déploiements, de même que les durées des enregistrements, sont donnés en Annexe 1 de ce partie.

### **La campagne d'érodimétrie des sédiments**

Cette campagne avait pour objectif de caractériser le comportement sédimentaire et sa variabilité en fonction des biocénoses benthiques dans le secteur de l'embouchure de la Seine. 22 carottages ont ainsi été réalisés durant la mission embarquée (N/O « Côtes de la Manche ») du 25 au 30 avril 2010. La localisation de ces carottages (figure 84) a été déterminée en concertation avec les benthologues.

Les coordonnées de ces stations de carottages sont précisées en Annexe 2 de cette partie.



**Figure 84.** Carte de localisation des carottages

#### 7.4. Synthèse des données altimétriques

##### **Description sommaire des types de fonds des sites d'implantation des stations**

Pour le site des Ratelets, selon les périodes d'intervention, la couche de sédiment de surface peut-être très différente et liée à l'agitation ou période de calme précédant ces interventions. Pour les stations subtidales, les types de faciès relevés proviennent des observations des plongeurs et des prélèvements à la benne (notamment lors de la mission de prélèvements de S. Lesourd d'avril 2009).

*Station Ratelets* : Lors de l'implantation (Oct. 2008) : une couche de vase fine (quelques cm) surmontant des sables fins. En Avril 2009 : Sables très fins en surface sur une vase très sableuse. En Septembre 2010, il était noté une couche de crème de vase de (2-3 cm) surmontant des sables très fins à moyens envasés (épaisseur décimétrique, selon les plongeurs) et, sous-jacent, une vase sableuse.

*Station Triangle des épaves* : Lors de l'implantation (Oct. 2008) : Vase très sableuse en surface. Fond ridé (5 cm de hauteur environ signalé par les plongeurs). En Avril 2009 : Vase sableuse (quelques cm) sur sables fins envasés.

*Station Ratier SE* : Une couche de crème de vase (quelques cm) surmontant une vase grisâtre très compacte.

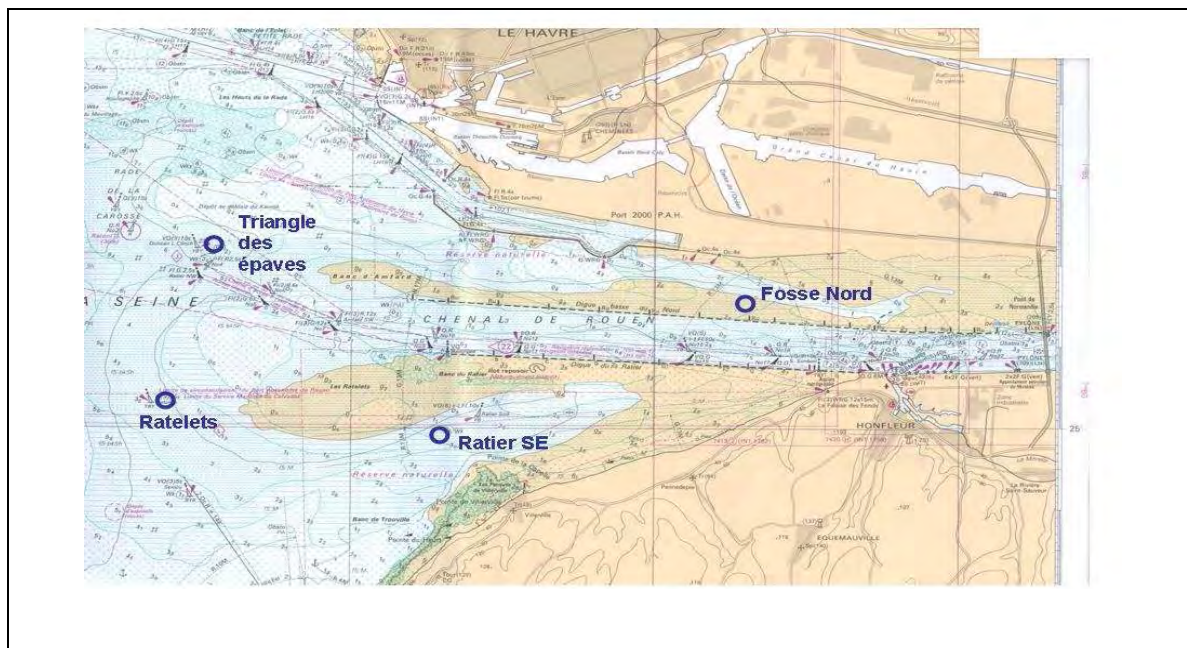
*Station Fosse Nord* : Vase avec silts et sables fins comportant des passées plus riches en sables fins.

Un planning de synthèse des différentes mesures altimétriques, complété par leur positionnement, est fourni sur les Figures 85 et 86.

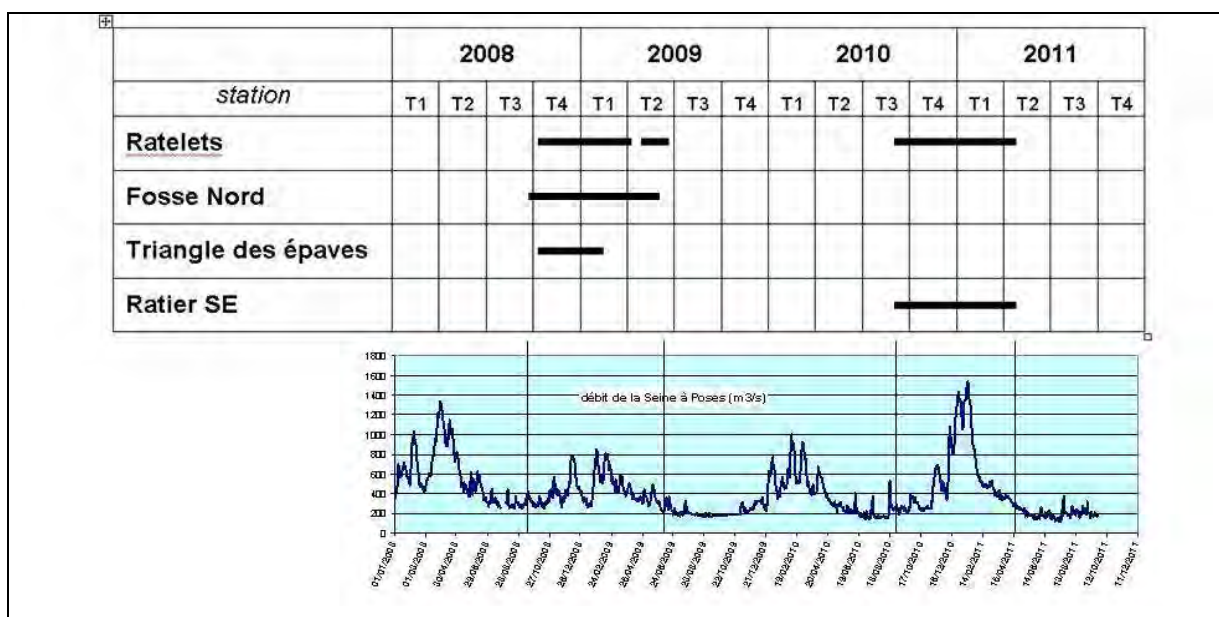
L'examen de la figure 87 permet d'évaluer la représentativité des périodes de mesures d'un point de vue météorologique. Quatre roses des vents ont été produites sur la base d'une information homogène, à savoir la simulation 4 fois par jour du vent au large de La Hève à l'aide du modèle météorologique Arpège de Météo-France, pour la période 1995-2011 (16 ans). La rose globale (fig. 87a) fournit une image de la statistique des vents en baie de Seine, avec une dominance bien marquée du secteur SW à W, en particulier pour les vents forts. La figure 87b montre que, pendant la période des mesures (de septembre 2008 à juin 2009 et de septembre 2010 à mai 2011), les statistiques de vent sont assez fidèles aux statistiques sur 16 ans. Cela reste vrai si l'on considère la seule période 2 (septembre 2010-mai 2011), mais l'est un peu moins pour la première période (septembre 2008 à juin 2009), au cours de laquelle les vents d'ouest sont dominants. Il est remarquable de constater la rareté des vents de nord et de sud-est.

Cet aperçu rapide des conditions météorologiques au cours de la période de mesure nous indique que les conditions environnementales rencontrées sont à peu près représentatives, et viennent donc renforcer l'analyse de la dynamique qui sera faite à partir des mesures d'érosion/dépôt.



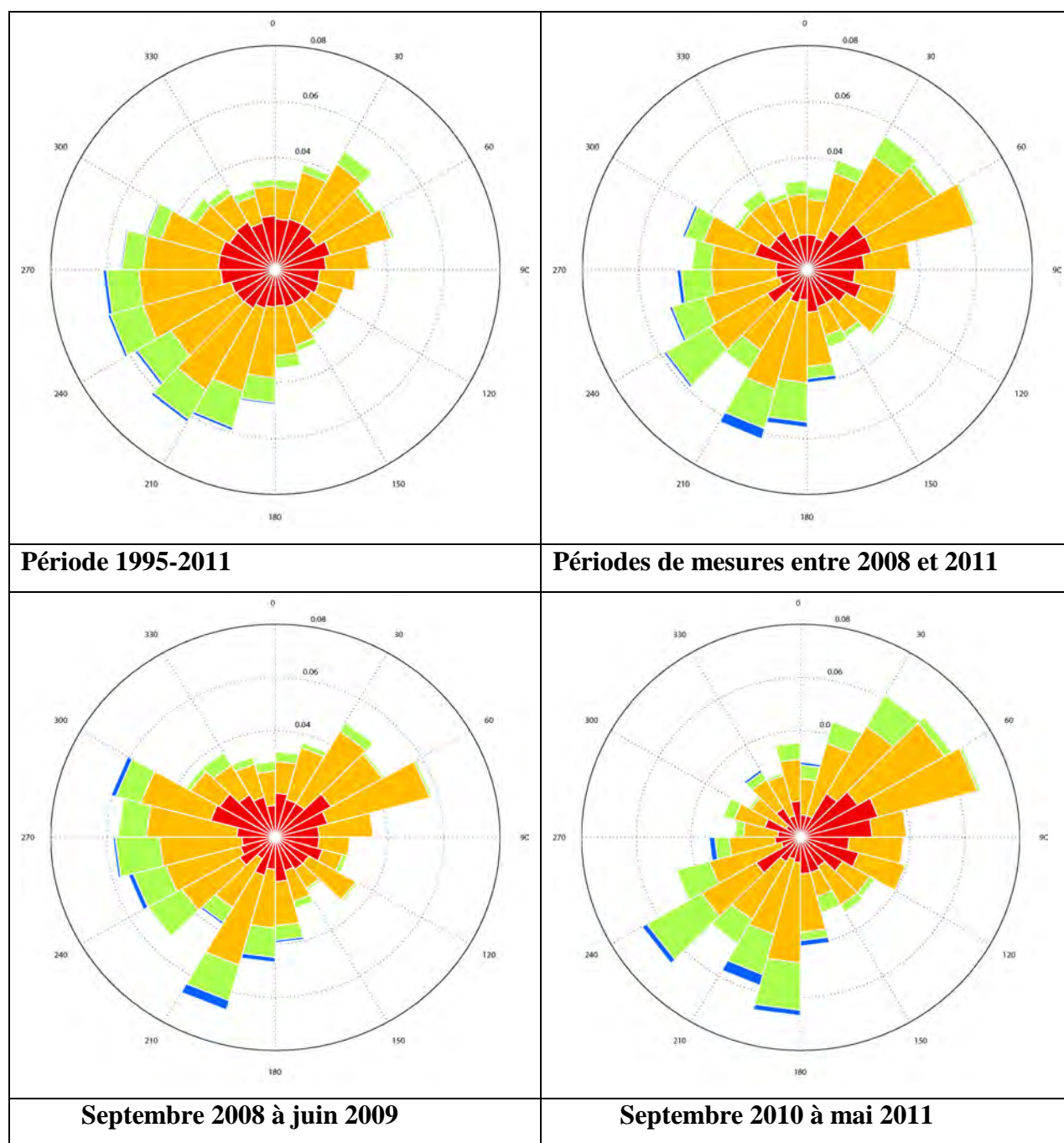


**Figure 85.** Synthèse des mesures altimétriques ALTUS menées de 2008 à 2011 à l'embouchure de la Seine. Positionnement des stations.



**Figure 86.** Planning des mesures altimétriques réalisées, et débit de la Seine à Poses.

S'agissant des débits, représentés sur la Figure 86, on observe une bonne variabilité de ceux-ci pendant les périodes de mesures, entre  $250$  et  $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  de septembre 2008 à juin 2009, et entre  $200$  et  $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en 2010-2011. En particulier la deuxième période de mesure a encadré une crue bien représentative de celles de la Seine.



**Figure 87.** Statistiques de vents en baie de Seine (49.5 °N, 0.0 °E) calculées à partir d'une simulation du modèle ARPEGE de Météo-France (résolution : 0.5°). Légende commune aux 4 roses : coordonnée radiale : probabilité ; rouge : vents entre 0 et 5 m/s, orange : vents entre 5 et 10 m/s, vert : vent entre 10 et 15 m/s ; bleu : vent entre 15 et 20 m/s.

## Analyse des enregistrements de la 1<sup>ère</sup> période (COLMATAGE 1 / 2008-2009) des mouillages ALTUS

Outre les données altimétriques, chaque système ALTUS mesure également la pression selon des cadences permettant de capter aussi bien la marée et les surcotes/décotes météorologiques que la répartition spectrale de l'énergie des vagues. Les résultats et discussions sont présentés à partir des 3 séries de diagrammes des stations Ratelets, Triangle des épaves et Fosse Nord. Le positionnement des stations est donné en Annexe 1 de cette partie.

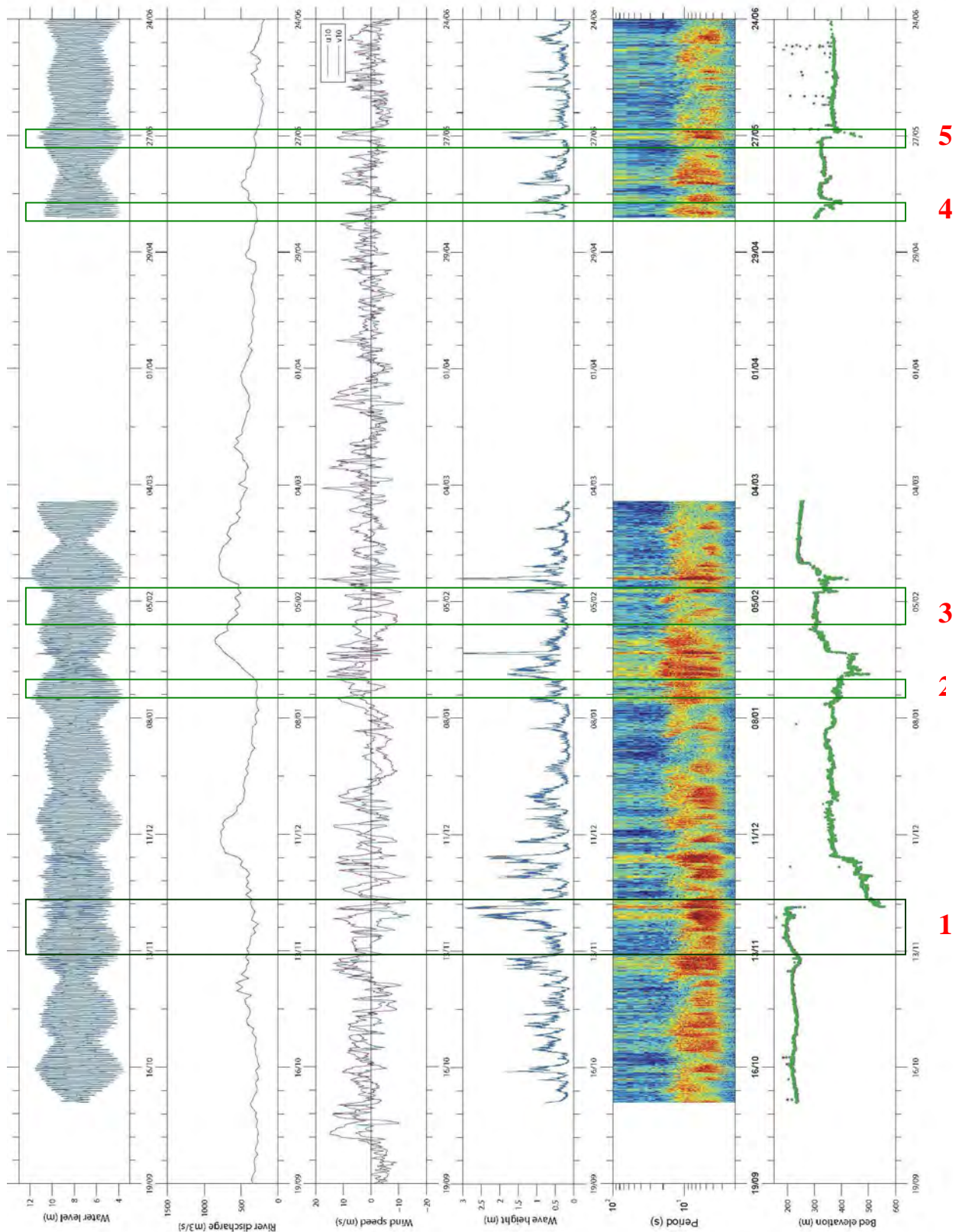
Chaque enregistrement comporte : la hauteur d'eau, le débit fluvial, les composantes de vitesse du vent, les hauteurs de vagues ( $H_{sig}$ ), la période des vagues et les variations du niveau de sédiment, mettant ainsi en évidence les phases de dépôt/érosion du sédiment. Selon les stations, 7 à 9 mois de mesures ont été enregistrés.

Les caractéristiques des vents (vitesse et direction) au cours de la période de mouillage des équipements, de septembre 2008 à juin 2009, sont données en Annexe 3 de cette partie.

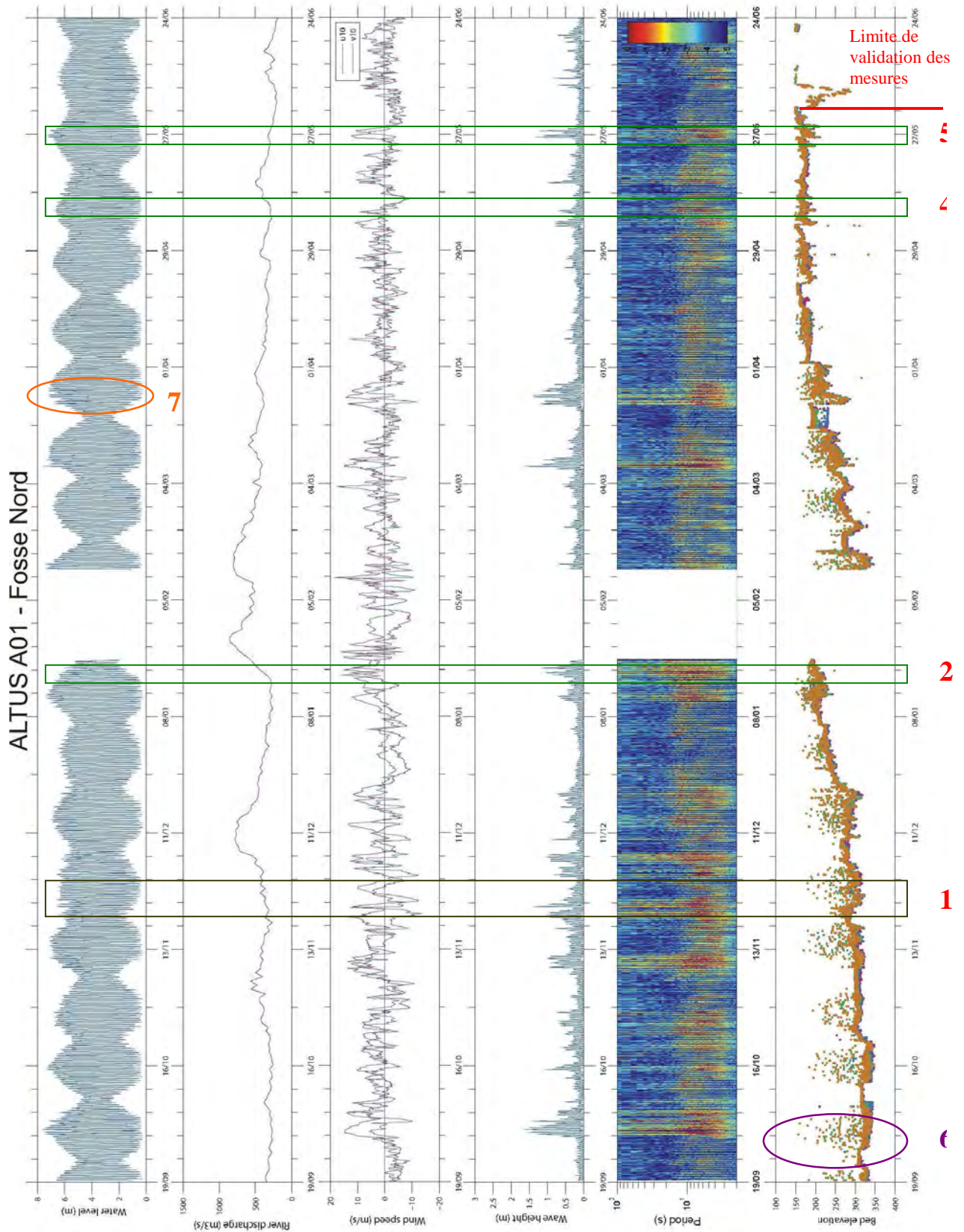
Pour cette campagne de mesures, la programmation des systèmes ALTUS des trois stations (Ratelets, Triangle des épaves et Fosse Nord) était la suivante : (1) *Vagues* : bursts de 520 mesures (260 s à 2Hz), toutes les 16 min, (2) *Altimétrie* : 4 mesures durant 260 s toutes les 16 min.

L'analyse globale des variations altimétriques de ces stations (Figures 88 à 90) fait ressortir des érosions/dépôts pouvant être très marqués (plusieurs décimètres), surtout pour la station externe *Ratelets* (Figure 88). Le site des *Ratelets* se présente globalement comme étant «en équilibre» sur la période de 5 mois (octobre 2008 à fin février 2009), après des situations érosives intenses suivies de rechargements. Ensuite, pour la période de 45 jours s'étendant du 07/05 au 24/06/2009, il est constaté une érosion de 8 cm, à mettre en relation avec une période d'agitation comme il sera discuté par la suite. Concernant le site en *Fosse Nord* (Figure 89), il est constaté un lent engraissement sur la période de 9 mois, avec un dépôt résiduel de 16 cm sur cette période ; cet engraissement apparaît plus intense sur la période s'étendant de mi-décembre 2008 à mi-janvier 2009 et est à corréliser avec une période d'agitation pratiquement nulle. Quant au site du *Triangle des épaves* (Figure 90), il est difficile d'interpréter une différence entre niveaux de sédiment final et initial pendant la période de 6 mois d'enregistrements, la station ayant, semble-t-il, subi un chalutage au cours de la 1<sup>ère</sup> quinzaine de décembre 2008. Le système a été remonté le 03/04/2009 après plusieurs investigations par plongeurs.



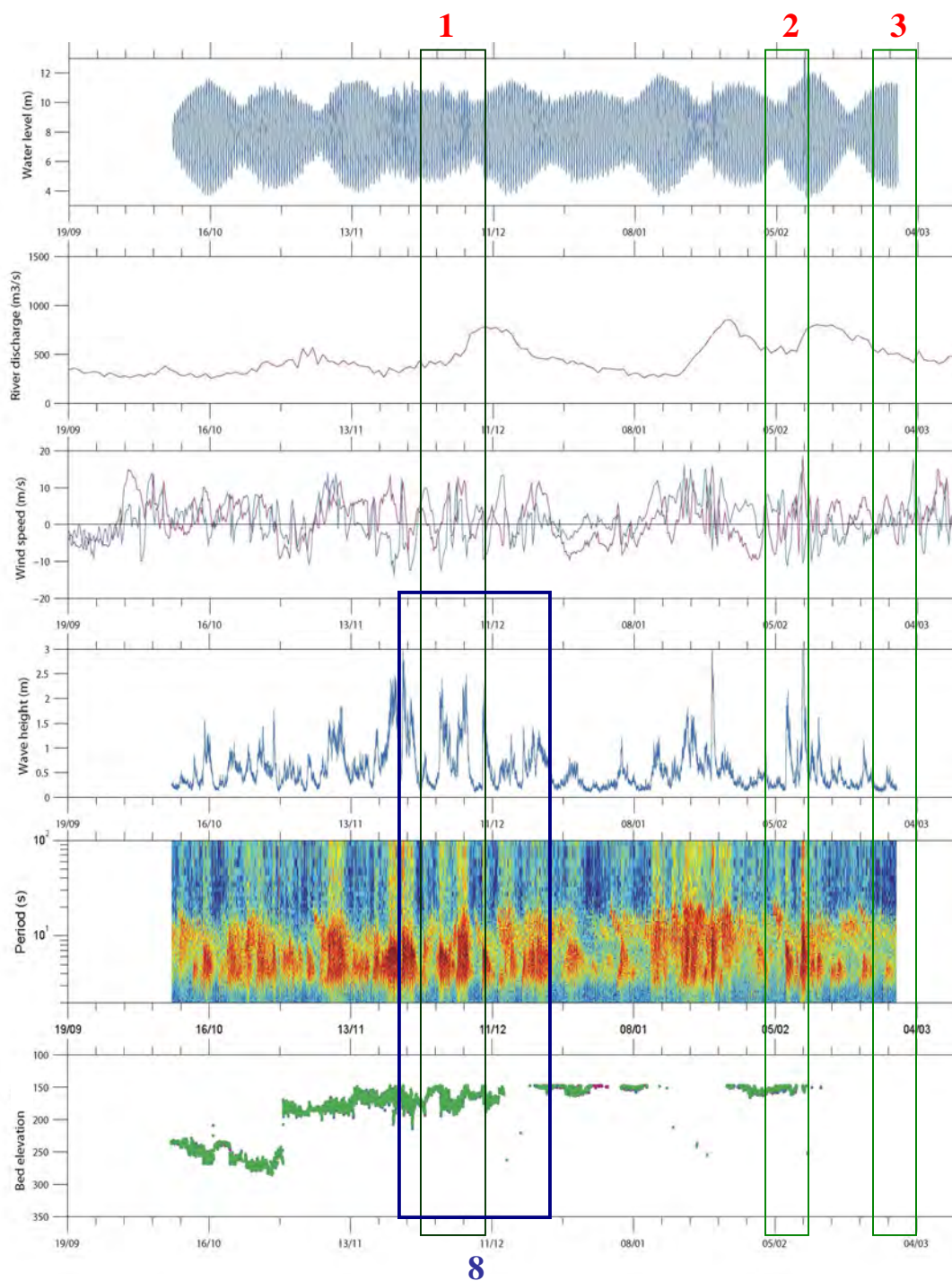


**Figure 88.** Enregistrement ALTUS aux Ratelets (Octobre 2008 – Juin 2009) – Les valeurs altimétriques sont données en mm.



**Figure 89.** Enregistrement ALTUS en Fosse Nord (Septembre 2008 – Juin 2009) – Les valeurs altimétriques sont données en mm.





**Figure 90.** Enregistrement ALTUS au « Triangle des épaves » (Octobre 2008 – Février 2009)  
– Les valeurs altimétriques sont données en mm

Quels ont été les principaux événements durant ce cycle d'enregistrements marqué par des périodes d'agitation importantes (vagues atteignant 3 m pour les stations externes) alternant avec des périodes calmes ?

Plusieurs constats peuvent être établis en analysant les variations altimétriques (érosion/dépôt) en fonction des forçages océano-météo :

**Aux Ratelets et en Fosse Nord.** Les érosions générées par des vagues de hauteur significative de 2 à 3 m (N° 1 à 5 sur les Figures 88 et 89) sont particulièrement actives aux Ratelets et le sont corrélativement très peu sur les deux autres sites. Elles sont principalement engendrées lors de tempêtes de secteur ouest. L'érosion aux *Ratelets* de 35 cm de sédiment lors de l'épisode N° 1 (Figure 88), le 24/11/2008, est brutale et survient après quatre jours de tempête (avec vents de NNW à W de  $15 \text{ m.s}^{-1}$ ) et des vagues de hauteur significative de 3 m. Une explication peut-être la suivante : lors du 1<sup>er</sup> épisode de vagues (20-23/11/2008) un phénomène de liquéfaction du sédiment (faciès de sables fins légèrement envasés, à caractère thixotrope) ; due à l'effet de cisaillement oscillant généré par les vagues ; permet une érosion en masse de ce sédiment au cours du 2<sup>ème</sup> épisode de vagues (le 24/11/2008) plus brutal et intense que le premier. Aucune incidence de cet épisode érosif n'est enregistrée à la station *Triangle des épaves* (figure 90) et il est constaté une faible érosion de 4 cm à la station *Fosse Nord* (figure 89). La mesure de pression en continu avec le système ALTUS a permis de connaître l'amortissement des vagues dans ce secteur de la *Fosse Nord* ; il est estimé entre 50 et 60 %. Ainsi, le 24/11/2008, alors que la hauteur des vagues ( $H_{sig}$ ) aux *Ratelets* était de l'ordre de 2.50 m à 3.00 m, elle n'atteignait que 1,00 m à 1,30 m en *Fosse Nord*.

Les épisodes érosifs N° 4 et 5 aux *Ratelets*, par vents de secteur ouest, découpent respectivement 11 et 13 cm avec des hauteurs de vagues ( $H_{sig}$ ) de 1.10 m et 1.80 m ; les hauteurs correspondantes sont alors de 0,60 m et 1,30 m à la station *Fosse Nord*.

En revanche force est de constater qu'une période d'agitation (avec des vagues de 2 à 3 m) peut conduire à des épisodes érosifs de l'ordre de la journée, mais aussi à des épisodes de rechargement ; ainsi, aux *Ratelets* (Figure 88), le rechargement après l'épisode N° 1 s'établit avec des vagues de 2 m et des vents de secteurs SW à W sur quelques jours. Il est semble t-il raisonnable d'envisager un apport essentiellement sableux (en nappage temporaire et/ou par transit près du fond). En effet, l'écho reçu par l'ALTUS n'est pas perturbé et ne correspond pas à un dépôt de type « crème de vase ». Il en est de même lors du rechargement après l'épisode érosif N° 2 ; celui-ci s'effectue en un seul jour, avec des vagues de 3 m et des vents de secteur est. Parfois ce rechargement se produit en période de calme, sur une période légèrement plus longue, comme lors de l'épisode N° 3. Il est alors constaté que les dépôts sont particulièrement importants. Cela met en relief une très forte capacité de mobilité des sédiments ; il en sera également discuté lors des analyses de la 2<sup>ème</sup> période d'acquisition de données (COLMATAGE 2, 2010-2011).

Concernant la *Fosse Nord*, il est à noter : (i), sur le graphe du bas de la Figure 89, les très fortes turbidités enregistrées au voisinage du fond lors des cycles de Vives-Eaux (N° 6 sur ce graphe) ; (ii) qu'à partir du 03/06/2009, en *Fosse Nord*, les données altimétriques ne sont plus valides par suite d'une déstabilisation du support trépied du transducteur.

**Au Triangle des épaves** : les épisodes d'érosion/dépôt sont peu marqués sur ce site (figure 90) mis à part un brusque dépôt de sédiment (de l'ordre de 7 cm) le 30 octobre 2008, qui ne trouve pas d'explication en fonction des événements océano-météo connus. Par ailleurs, plus tard, le tripode support du système ALTUS semble avoir été déstabilisé par un chalutage, selon les observations des plongeurs lors de la relève définitive. Ce chalutage pourrait avoir eu lieu après la 1<sup>ère</sup> relève des données *in situ* par l'équipe des plongeurs, le 11 décembre 2008. De ce fait, la distance entre le transducteur et le sédiment s'est trouvée réduite (inférieure à 15 cm) impliquant un phénomène de « saturation » du signal avec perte de l'écho.

Les remaniements plus faibles constatés à cette station peuvent, peut-être, trouver une explication par le type de faciès sédimentaire. Par rapport à la station *Ratelets*, la fraction sableuse du sédiment de surface y est plus grossière. Une illustration peut être donnée avec la période d'agitation marquée sur ce secteur fin Novembre 2008 (N° 8), avec des vagues de Hsig de 3 m qui ne produisent qu'une érosion de l'ordre de 5 cm. A noter aussi que d'une manière générale, les hauteurs de vagues au Triangle des épaves sont proches de celles observées aux Ratelets.

Plus généralement, sur les trois sites instrumentés, les enregistrements de « surcotes » sont relativement fréquents (exemple N° 7 sur les graphes *Fosse Nord* (figure 89)). Il s'agit en fait ici de « surpressions », et il faudrait enlever la variation concomitante de la pression atmosphérique pour en déduire la vraie valeur de surcote

Les constats établis lors de cette première période de 9 mois d'enregistrements sur deux secteurs « externes » (*Ratelets* et *Triangle des épaves*) et un secteur « interne » à l'estuaire (*Fosse Nord*) conduisent à conclure que :

- les érosions les plus marquées proviennent de l'action des vagues engendrées par des vents de secteur Ouest. A l'embouchure de l'estuaire, le rôle des vagues sur les remaniements sédimentaires superficiels domine nettement celui de la marée. Ce dernier n'est pas négligeable mais ce n'est pas le forçage le plus important en terme de matériel érodé. Sur cette séquence, les enregistrements n'ont pas permis de déceler une action du forçage débit fluvial sur ces remaniements. Cependant il est à noter que

les événements de crue ont été à chaque fois accompagnés de périodes d'agitation élevée, d'où la difficulté d'apprécier la contribution de ce forçage « débit fluvial »

- le site instrumenté en Fosse Nord a permis de quantifier l'amortissement des vagues (de 50 à 60 %) par rapport aux stations externes des Ratelets et du Triangle des épaves.

### **Analyse des enregistrements de la 2<sup>ème</sup> période (COLMATAGE 2 / 2010-2011) des mouillages ALTUS aux stations Ratelets et Ratier Sud Est**

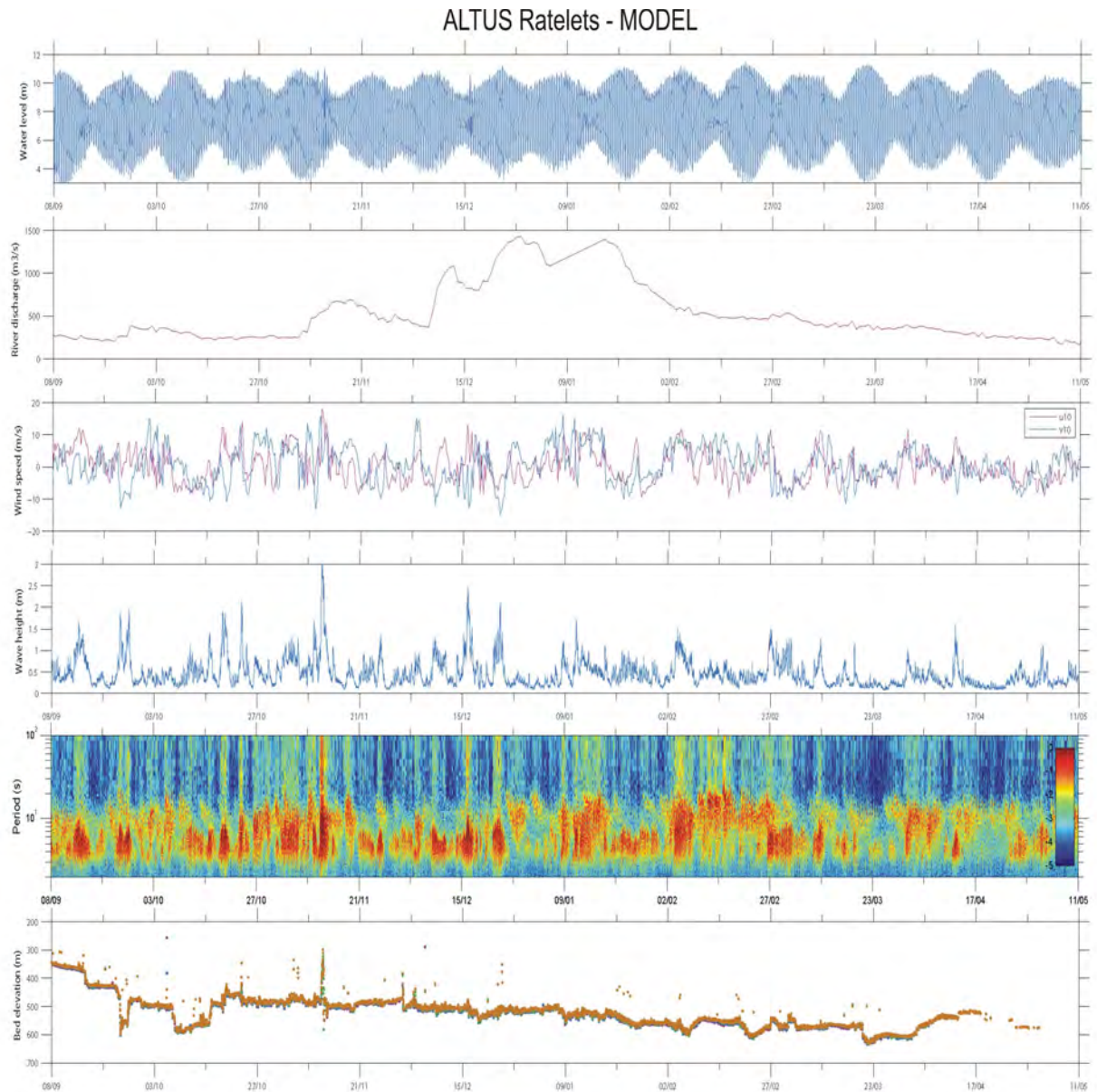
L'étude des corrélations entre variations morpho-sédimentaires et forçages physiques s'est poursuivie au sein du projet MODEL 2 par la mise en place de deux stations de mesures altimétriques ALTUS, à l'embouchure, en domaine subtidal sur la période septembre 2010 à mai 2011. La station des Ratelets a été replacée au même endroit pour cette nouvelle campagne de mesures altimétriques, les résultats concernant la 1<sup>ère</sup> campagne sur ce secteur ayant été fructueux et jugés représentatifs de cette zone externe d'embouchure. Le secteur du Ratier, en Fosse Sud, était un secteur identifié comme important pour la validation du modèle numérique hydro-morpho-sédimentaire. Sur cette station du Ratier, pour les besoins du projet MODEL 2, le système ALTUS a aussi été complété pour la mesure de la turbidité en surface et au voisinage du fond.

Le positionnement de ces deux stations est donné en Annexe 1 de cette partie.

Au cours de la période de mouillage des équipements, de septembre 2010 à mai 2011, les caractéristiques des vents (vitesse et direction), sont données en Annexe 4 de cette partie.

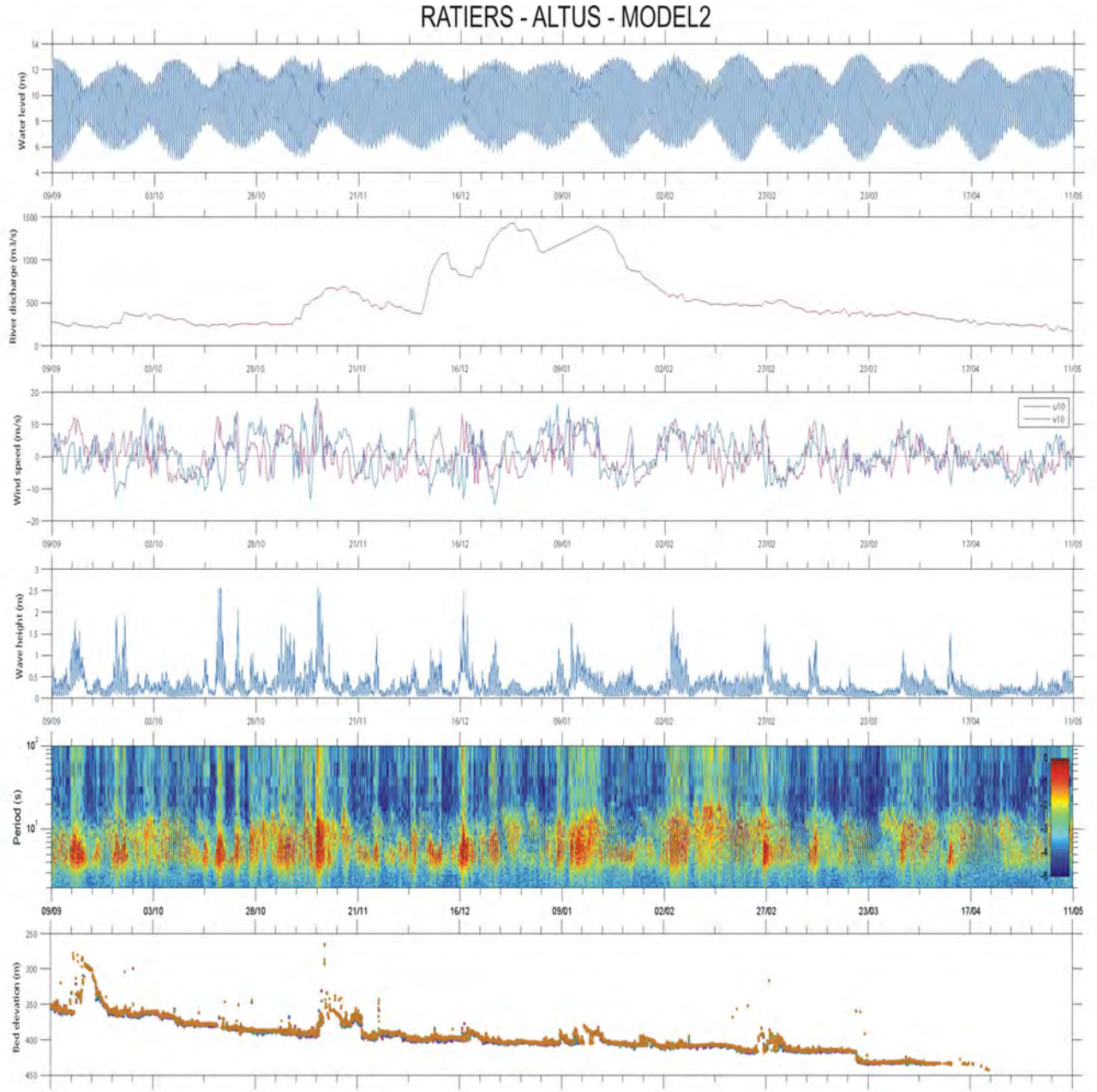
Tout comme pour la 1<sup>ère</sup> période (COLMATAGE 1 / 2008-2009) les résultats et discussions sont présentés à partir des 2 séries d'enregistrements aux stations *Ratelets* et *Ratier* (figures 91-92 et Annexes 5 a, 5 b, 6 a et 6 b). Chaque enregistrement comporte : la hauteur d'eau, le débit fluvial, les composantes de vitesse du vent, les hauteurs significatives de vagues, la période de la houle et les variations du niveau de sédiment, mettant ainsi en évidence les phases de dépôt/érosion du sédiment.

Lors de cette seconde campagne de mesures, la programmation des systèmes ALTUS des 2 stations (Ratelets et Ratier) était la suivante : (1) *Vagues* : bursts de 560 mesures (280 s à 2Hz), toutes les 35 min, (2) *Altimétrie* : 7 mesures durant 280 s toutes les 35 min.



**Figure 91.** Totalité de l'enregistrement ALTUS à la station Ratelets (8 septembre 2010 – 11 mai 2011) – Les valeurs altimétriques (graphe du bas) sont données en mm

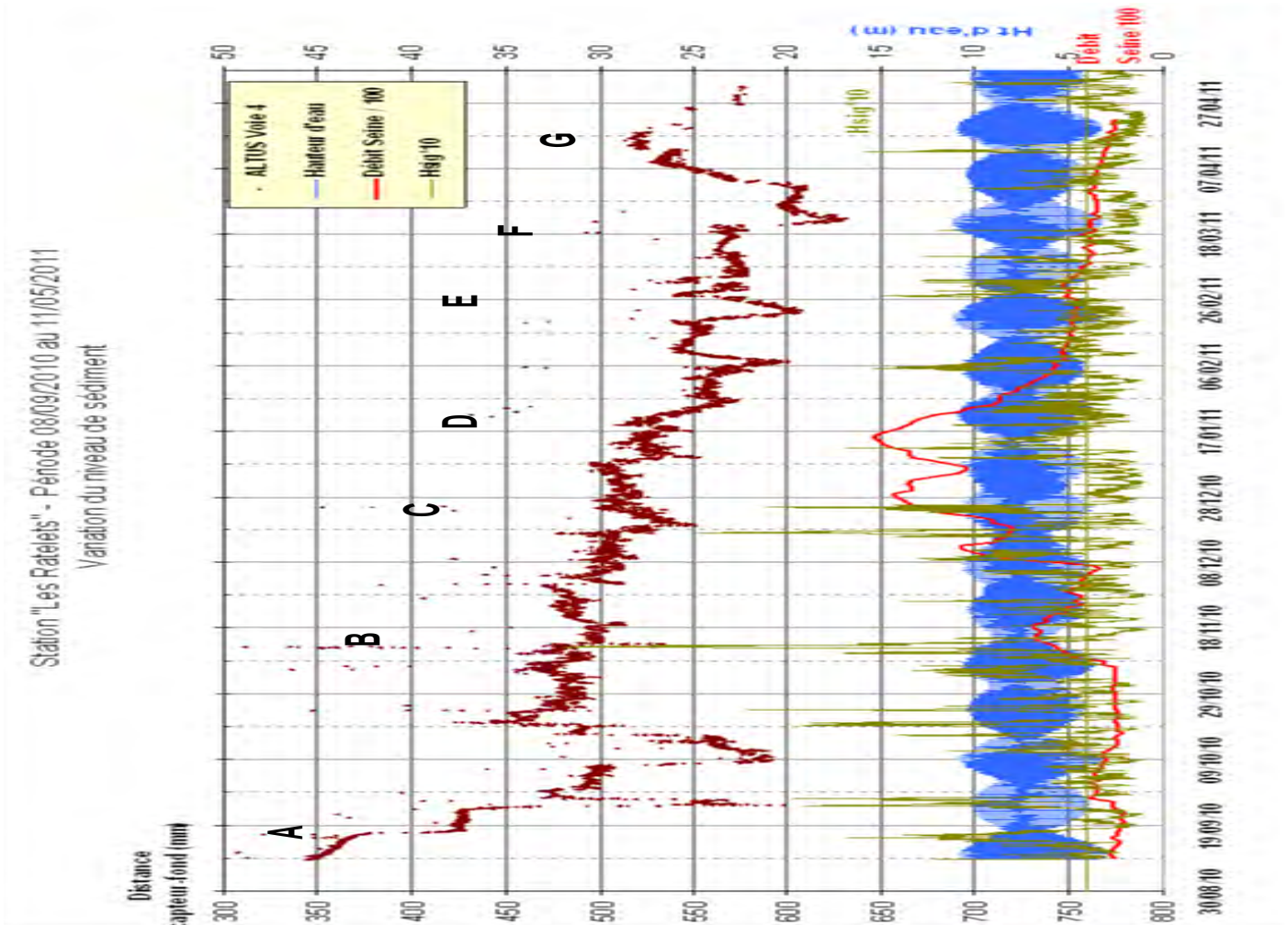




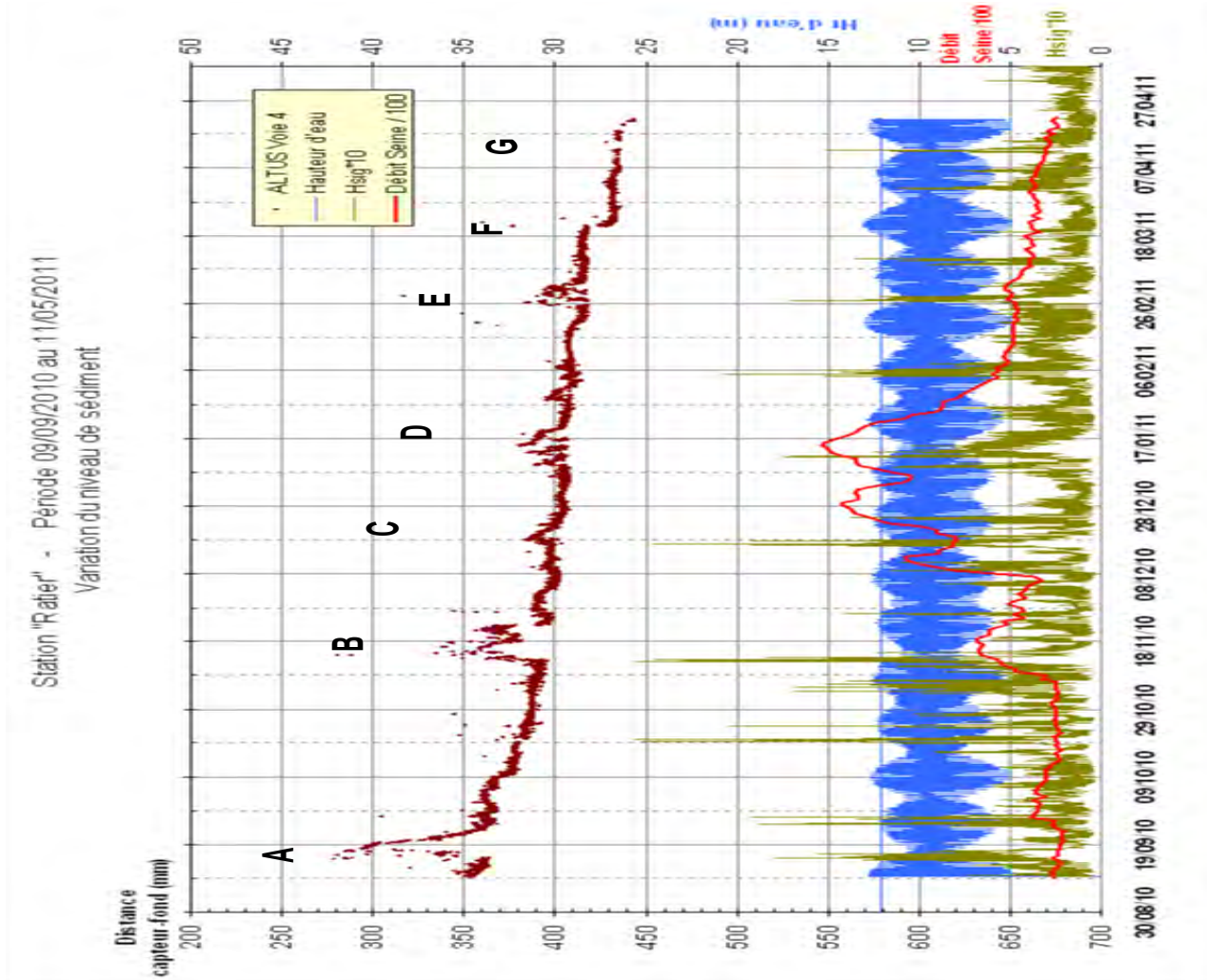
**Figure 92.** Totalité de l'enregistrement ALTUS à la station Ratier (09 Septembre 2010 – 11 Mai 2011) – Les valeurs altimétriques (graphe du bas) sont données en mm



Afin d'expliciter plus aisément les divers événements océano-météo impliquant des variations altimétriques, des loupes identifiées à partir des enregistrements aux deux stations *Ratelets* et *Ratier* (repères A à G des Figures 93 et 94) sont discutées. Ces loupes encadrent les événements sur une période de l'ordre de la quinzaine de jours.



**Figure 93.** Positionnement des loupes et événements [A à G] analysés dans le texte sur le site des Ratelets (totalité de la période d'enregistrements).



**Figure 94.** Positionnement des loupes et événements [A à G] analysés dans le texte sur le site du **Ratier** (totalité de la période d'enregistrements)

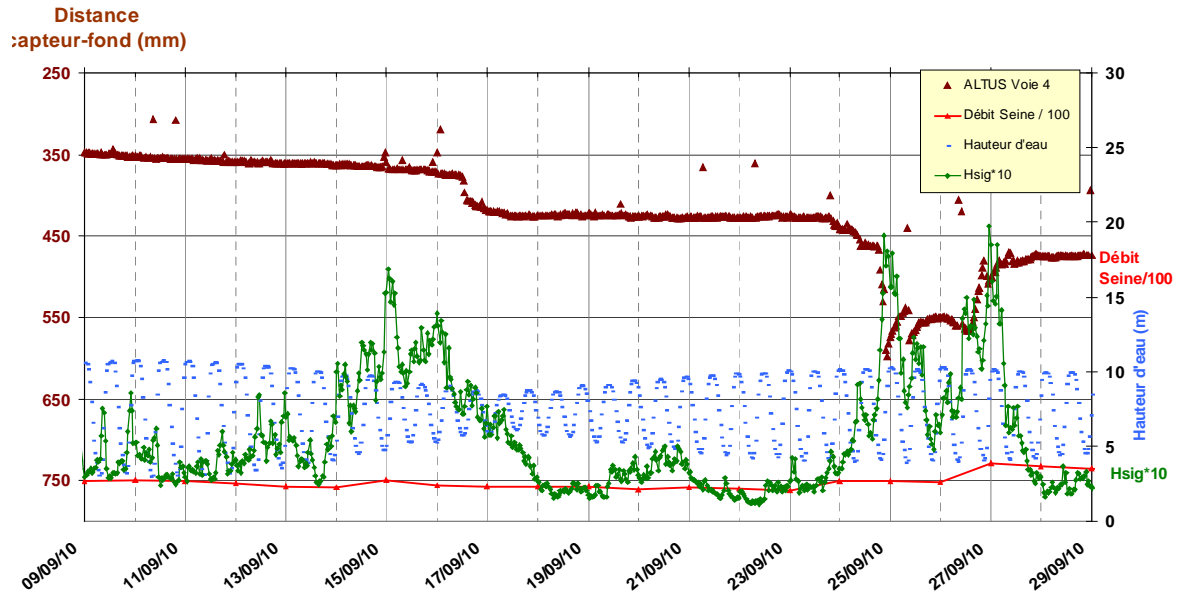
L'analyse globale des enregistrements altimétriques de ces 2 stations *Ratelets* et *Ratier* sur 8 mois (Annexes 5 et 6 de cette partie et Tableau 9) fait ressortir des variations pouvant être très marquées notamment aux *Ratelets*. A noter que sur l'ensemble de la période d'enregistrements, on constate une érosion résiduelle relativement régulière atteignant 23 cm aux *Ratelets* et 10 cm au *Ratier*.

Le tableau 9 synthétise les principales variations altimétriques en fonction des divers forçages.

**Tableau 9.** Analyse de divers événements relevés dans les enregistrements ALTUS (Stations *Ratelets* et *Ratier*) sur la période 08/09/2010 – 11/05/2011. Relations avec les forçages.

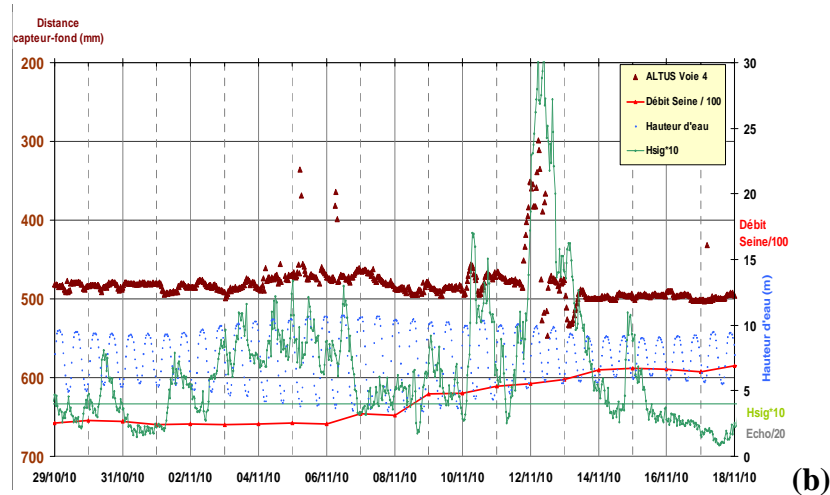
	Num. événement	Période	Erosion		Dépôt		Coeff.	Débit Seine m <sup>3</sup> /s	Vagues Hsig (m)	Vent	
			(cm)	durée (j)	(cm)	durée (j)				Direction	Vitesse (m/s)
<b>Ratelets</b>	<b>A</b>	16/09/10	6	1			35	242	0.9 - 1.6	NW	9.6
		24/09/10	15	1			86	264	< 0.4	NW	12.8
		26/09/10			9	1	84	258	< 1.6	NW	11.3
<b>Ratier SE</b>	<b>A</b>	15/09/10			7	3	47	271	0.5 - 1.6	NW	11.6
		19/09/10	7	1			49	229	< 0.2	W	6.6
<b>Ratelets</b>	<b>B</b>	11-12/11/10			15	<1	64-52	545	< 0.6	NW	17.3
		12-13/11/10	15+5	1			52-42	580	0.9 (13/11)	WNW	16.8
<b>Ratier SE</b>	<b>B</b>	12 et 20/11/10			3+2	2 + 2	52 à 36	660	< 0.9 et < 0.5	NNW-W	16.8 (12/11)
		16 et 23/11/10	2+3	3 + 2			39-84	668 - 522	2.4(16-17/11)	W et NW	10.3(17/11)
<b>Ratelets</b>	<b>C</b>	16-19/12/10	5.5	3			44 à 63	800	< 0.9	SW à NW	15.9 (16/12)
		19-24			5	4	63 à 90	800 à 1200	2.5 (24/12)	SSW-NW-NNE	15.3 (24/12)
		23-25/12/10	2 à 4	3	2 à 4	3	90 à 88	1200 à 1300	2.5 (24/12)	NE	15.3 (24/12)
<b>Ratier SE</b>	<b>C</b>	18/12/10			2	<1	53	800	< 1.1	SW	10.5
<b>Ratelets</b>	<b>D</b>	7-18/01/11	5	2 + 9			83 à 72	1100 à 1550	1.2 (17-18/12)	SSW à NNW	18.3 (08-10/01)
		18/01/11			2.5	<1	68	1400	< 1.2	NNW	13.1 (17/01)
		21-26/01/11	4.5	5			101(105) 70	1280 à 880	1.8 (21/01)	ENE à NNW	4 à 11
<b>Ratier SE</b>	<b>D</b>	08-12et15/01/11			1.5 à 2	1	78, 46, 35	1300,1440,1550	< 0.4	W à SW et SW	18.3 (08/12) 15.4 (11/01)
<b>Ratelets</b>	<b>E</b>	19-21/02/11	5	2.5			111 à 115	450	1.0 (19/02)	NW (19et20) SSE (le 21)	10.3 (19/02)
										SW	10.1 (23/02)
		23-25/02/11			3.5	3	89 à 45	510	< 0.5	SW	10.1 (23/02)
		26/02-04/03	4	1	4 (+3)	1	40 à 83	510	< 0.6 jsq .03/03 < 0.4 (03-04/03)	WNW (26-27) NE (?04/03)	12.4 (26/02) 11-12 (01-02/03)
<b>Ratier SE</b>	<b>E</b>	25/02 - 04/03	3	1	3	2.5	45 à 83	510	< 0.6 jsq.03/03 < 0.4 (03-04/03)	SSW (25) NW(26 27) NE (? 04/03)	11-12 (01-02/03) 12 (03/03)
<b>Ratelets</b>	<b>F</b>	20/03/11	4	<1			117	350	< 0.4	SW	< 4.5
		20-22/03/11	2	1.5			117(118)114	350	< 0.4	W (20-21)NE(22)	< 8
		22-27/03/11			2.5	4	114 à 38	350	< 1.4 (25/03) < 0.3 (26-27/03)	NE (22-23) W (25 26) E (27/03)	< 8
		02/04 - 11/05									
<b>Ratier SE</b>	<b>F</b>	20/03/11	1.5	1			117	350	< 0.4	SW	< 4.5
		21/03 - 02/04	0		0		118(37) 79	370	< 1.4 (23-25/03) < 0.3	N(21) E(22-24) W(25-26)E(27-28) SW(29/03-02/04)	<10 (31/03)

**L'action des vagues** produit des érosions souvent importantes, pouvant atteindre 15 cm en un jour. Ainsi aux *Ratelets*, les événements **A** (loupe **A** en Figure 95) avec l'érosion très marquée débutant le 24/09/10, **B** (loupe **B** en figure 96a) avec érosion des 12-13/11/10 d'un dépôt qui avait été constitué rapidement suite à une forte agitation les deux jours précédents, illustrent ces situations.

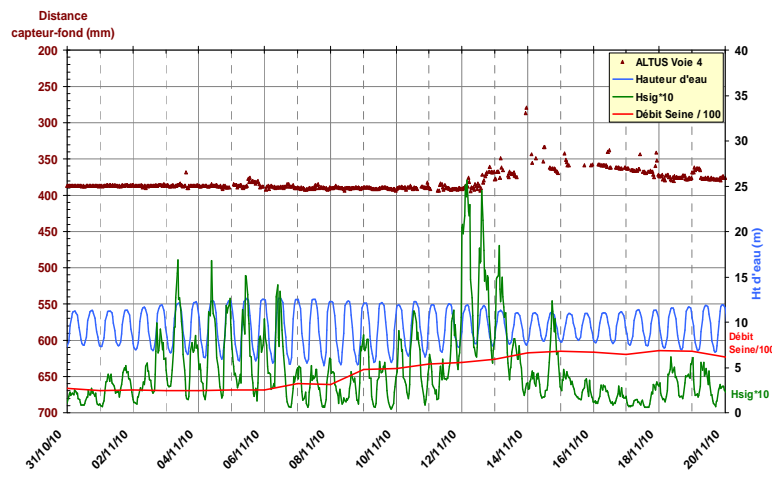


**Figure 95.** Loupe A - Enregistrements ALTUS. En haut « Les Ratelets », en bas « Le Ratier » - (voir Figure 93 pour le positionnement de l'événement)- Action des vagues (Hsig : 1.4 -2.0 m). En marron : altimétrie ; en vert : Hsig\*10 ; en bleu : hauteur d'eau ; en rouge : débit de la Seine ( $Q_{fl}/10^2$ ).

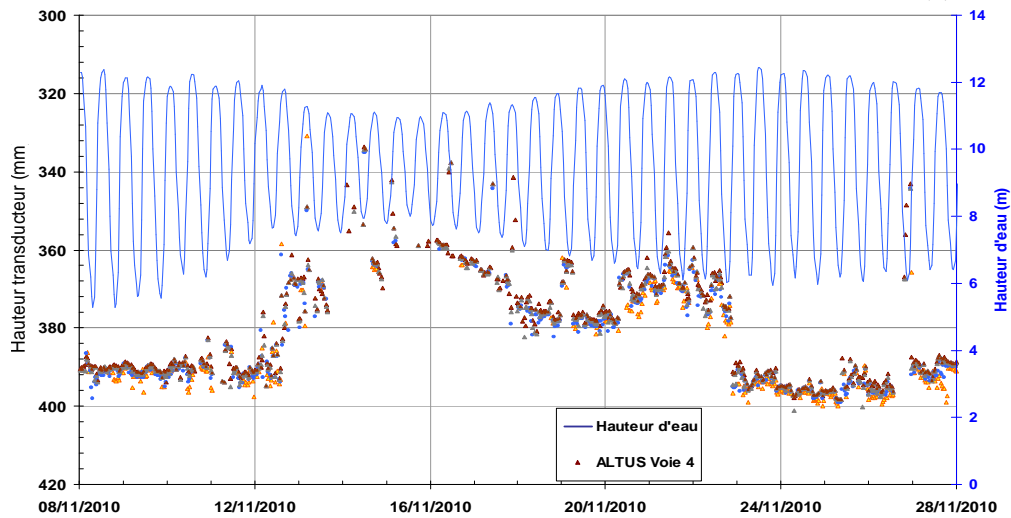
(a)



(b)



(c)

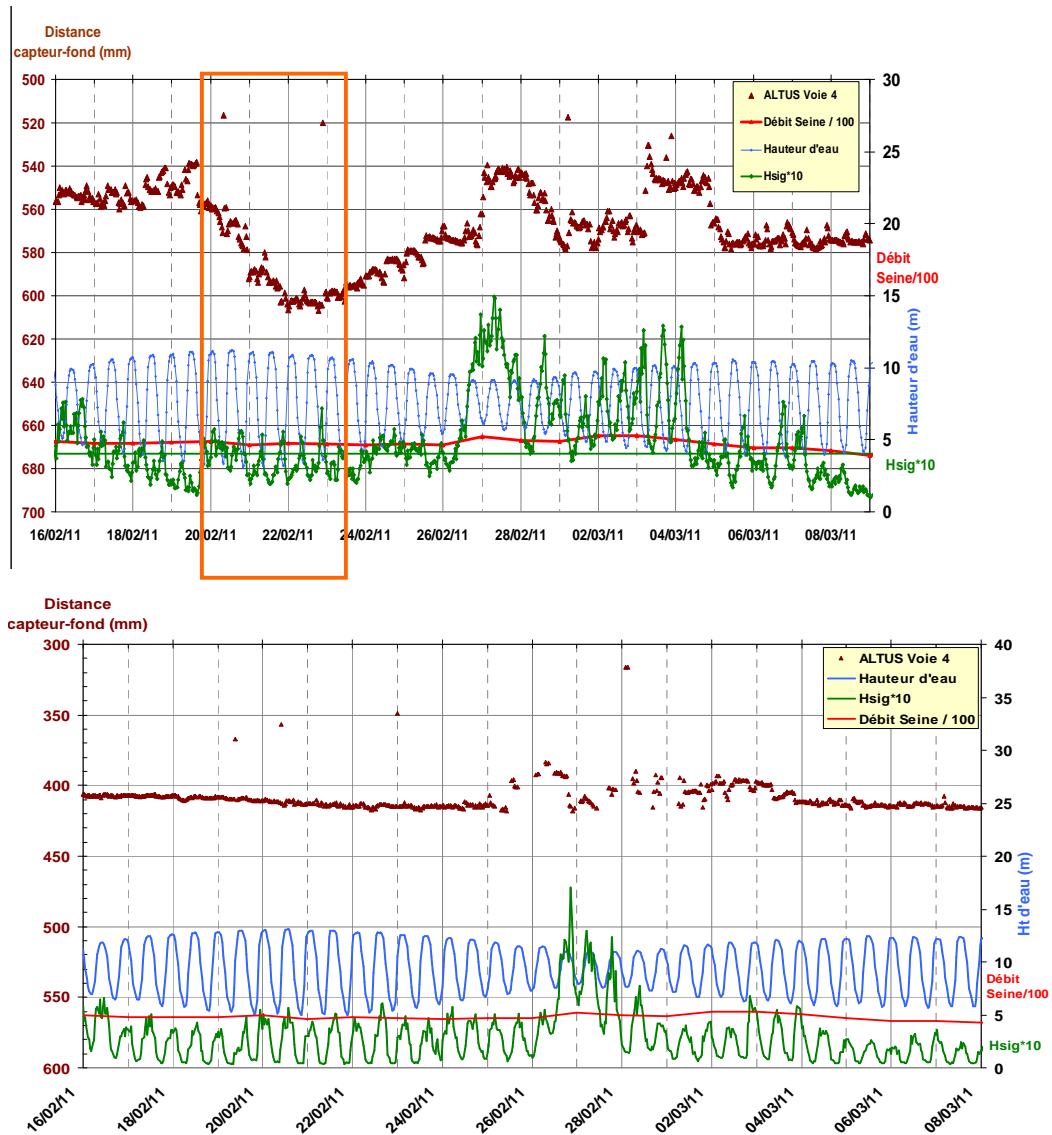


**Figure 96.** Loupe B. Enregistrements ALTUS. (a) : « Les Ratelets », (b et c) : « Le Ratier » - Action des vagues de Hsig : 3.2 m le 12/11/2010 - (c) est un agrandissement de (b) pour la période du 08 au 28/11/2010 – Les points orange, bleu et gris correspondent respectivement aux voies 1 à 3 de l'ALTUS signifiant un dépôt type « crème de vase ». Du 13 au 15/11, la turbidité au voisinage du fond est très élevée, entraînant la perte du « signal fond ».

Ce sont principalement les vents de secteurs nord-ouest à ouest qui sont responsables des plus importantes érosions aux *Ratelets*. Cependant, des vents de mêmes secteurs et de vitesses similaires engendrant des vagues de Hsig de 1,70 m peuvent avoir un effet érosif plus limité ; ainsi en **A** (Figures 91, 93 et Annexe 5 a de cette partie), lors de la période d'agitation du 14 au 17/09/10 l'érosion n'est que de 6 cm. Ils peuvent également générer des dépôts temporaires comme le 26/09/10 après transit près du fond de sables fins et dépôt de 9 cm.

L'implication de ces mêmes types de vents au *Ratier SE* peut avoir une réponse sédimentaire soit négligeable en terme d'érosion, comme pour l'agitation du 24 au 27/09/10 (loupe **A**/bas de la figure 95) ou provoquer un dépôt de « crème de vase » de 7 cm, du 15 au 18/09/10 (même figure). Ce dépôt va ensuite se consolider (tassement) en l'absence d'agitation et disparaître par l'action des marées de Vives-Eaux.

Il en est de même pour les deux événements **C** et **D** (Figure 93), avec des érosions de 5 cm (du 16 au 19/12/10 et du 07 au 18/01/11) aux *Ratelets* et un dépôt de « crème de vase » au *Ratier* de 2 cm aux deux mêmes périodes. Lors de l'événement **D**, la Seine est à son pic de crue maximum par rapport à toute la période des enregistrements ALTUS de 2008 à 2011, soit  $1550 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Il n'a pas été constaté, au niveau des variations altimétriques des deux stations ALTUS, d'incidence particulière liée à cette crue, même en considérant les quelques semaines qui ont suivi.



**Figure 97. Loupe E** - Enregistrements ALTUS. En haut « Les Ratelets », en bas « Le Ratier » (voir Figure 93 pour le positionnement de l'événement) - Action de la marée : Coeff. : 115 le 21/02/2011. Avec érosion de 5 cm aux Ratelets, sans effet au Ratier. A noter l'action des vagues ( $H_{sig} = 1,5$  m) aux Ratelets apportant un dépôt temporaire de sédiments principalement sableux et l'érosion concomitante au Ratier les 27/02 et 03/03/2011.

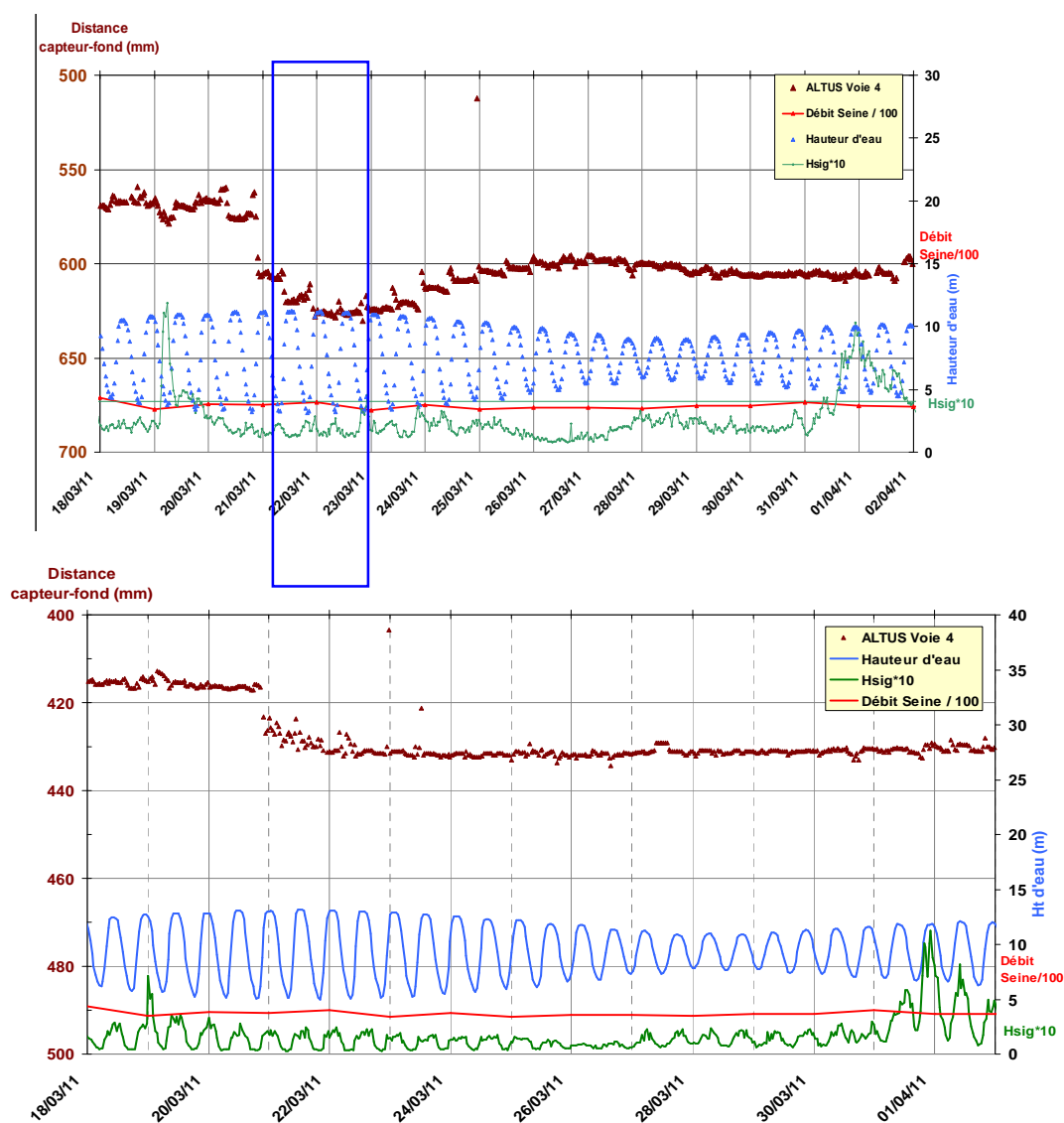


Aux *Ratelets* (Figure 97, loupe **E**) les vents de secteur WNW ( $12.4 \text{ m.s}^{-1}$ ) ont également provoqué 2 dépôts temporaires entre le 26/02/11 et le 04/03/11 d'un sédiment principalement sableux (voie 4 de l'ALTUS avec réflecteur sans discontinuité et pourcentage d'écho maximum non perturbé) d'une épaisseur de 3 cm. A la même période, au *Ratier*, il est constaté un dépôt type « crème de vase » (voie 4 de l'ALTUS montrant des discontinuités avec perte totale de l'écho maximum) de 3 cm pouvant être le résultat d'une redistribution en Fosse Sud du matériel fin par les vagues.

**L'action des très fortes marées de Vives-Eaux** sur la redistribution des sédiments est également bien mise en évidence dans ce jeu de données. Toujours sur la loupe **E** de la figure 97, lors des coefficients de 111 à 115 (voir encadré orange) et en présence de vagues très modérées, une érosion de 5 cm est visible sur l'enregistrement altimétrique aux *Ratelets*. Aucune incidence de cette action n'est enregistrée au *Ratier* (bas de la même Figure 97).

Un autre exemple de l'action de la marée peut être donné par la séquence des 20 et 21/03/11 (loupe **F** de la Figure 98) aux *Ratelets*. Pour des coefficients 117-118, par des vents de SW inférieurs à  $4.5 \text{ m.s}^{-1}$  et une très faible agitation ( $H_{\text{sig}} < 0.40 \text{ m}$ ), une érosion de 4 cm est provoquée, semble-t-il par les courants de flot (encadré bleu). Une érosion de 1,5 cm est également constatée au *Ratier*.

Enfin, il est à noter que les données en fin d'enregistrements altimétriques aux *Ratelets* et *Ratier* (événement **G** sur les Figures 93 et 94), du 02/04/2011 au 11/05/2011, ne sont pas valables pour cause de fouling (fixation de balanes en plusieurs couches sur les 2 transducteurs).



**Figure 98. Loupe F** - Enregistrements ALTUS. En haut « Les Ratelets », en bas « Le Ratier » (voir Figure 93 pour le positionnement de l'événement). Action de la marée - Coefficient de marée max. : 118 le 21/03/2011). Erosion de 6 cm aux Ratelets et 1,5 cm au Ratier.

### **Conclusions sur l'ensemble des variations altimétriques observées aux quatre stations : Ratelets, Triangle des épaves, Fosse Nord et Ratier, de 2008 à 2011**

Parmi les quatre sites instrumentés dans cette zone d'embouchure de la Seine, le site plus externe des *Ratelets*, considéré comme représentatif d'un large secteur, constitue le site le plus dynamique du point de vue des variations altimétriques. Les vents de secteurs sud-ouest à nord-ouest sont responsables des plus importantes variations altimétriques du niveau de sédiment. L'action des vagues peut entraîner des érosions d'une trentaine de centimètres sur ce site des *Ratelets*. Cette action érosive est renforcée lors d'épisodes successifs de tempêtes avec vagues de 2 à 3 m ; une liquéfaction du sédiment lors des premiers épisodes facilitant une érosion en masse des couches superficielles lors des tempêtes suivantes. Il est souvent constaté qu'après une phase érosive, suit un rechargement progressif, plus lent, de quelques jours à une dizaine de jours.

Lors d'épisodes d'agitations marqués par des vagues de hauteur significative de 2 - 3 m, il est fréquent de noter des plaquages temporaires de quelques centimètres de sédiments principalement sableux. Ces dépôts, particulièrement bien identifiés dans les enregistrements semblent provenir de transits « en masse », près du fond, d'une couverture sédimentaire déstabilisée par l'action des vagues.

Globalement ce site s'est présenté comme étant « en équilibre » sur la 1<sup>ère</sup> période de 5 mois (octobre 2008 à fin février 2009) ; cependant, sur la 2<sup>ème</sup> période de 7 mois (septembre 2010 à avril 2011), une érosion résiduelle de 23 cm est quantifiée.

Le site du *Triangle des épaves* montre des variations altimétriques du niveau de sédiment beaucoup plus faibles. Toutefois les problèmes encourus à la station de mesures ne permettent pas une analyse fiable sur la totalité des enregistrements.

A l'embouchure de l'estuaire, il a ainsi été montré le rôle dominant des vagues pour les mouvements sédimentaires. Toutefois, les enregistrements altimétriques ont mis en évidence un rôle non négligeable, de la marée pour éroder la couverture sédimentaire ; ceci dans le cas des très fortes marées de Vives-Eaux, comme il a été relevé. Cependant la marée ne constitue pas le forçage le plus important en terme de matériel érodé.

En *Fosse Nord*, le site instrumenté a permis de quantifier un engraissement résiduel de 16 cm sur 9 mois ; phénomène accentué lors des périodes marquées sans agitation (par exemple : mi-décembre 2008 à mi-janvier 2009). Pour ce site, les enregistrements de pression ont permis également une mise en évidence de l'amortissement des vagues de 50% par rapport aux stations externes.

Le site du *Ratier Sud Est* enregistre une érosion résiduelle de 10 cm sur les 7 mois de mesures. Les variations du niveau de sédiment, suite à des épisodes de vagues, sont beaucoup plus atténuées que pour la station des *Ratelets*. Cependant des épisodes érosifs sont présents sur ce secteur par vents d'ouest comme par vents de sud-est. Ce site présente une couverture sédimentaire originale. En effet, il est caractérisé par un faciès de vases (grises) très compactes recouvertes par des dépôts principalement vaseux facilement remobilisables. Il a été montré que lors de certaines périodes érosives aux *Ratelets* par tempêtes d'ouest, un dépôt parfois prononcé (2 à 5 cm) d'un matériel fin pouvait avoir lieu au *Ratier*.

Enfin, il n'a pas été relevé de variations notables du niveau de sédiment lors des périodes de débits élevés de la Seine (même à la suite des débits de 1300 à 1550 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> durant la 1<sup>ère</sup> quinzaine de Janvier 2011).

#### 7.5. Analyse des résultats de la campagne d'érodimétrie d'avril 2010, rôle de la faune benthique

Trente et un tests ont été étudiés sur les 22 carottages réalisés et à différents niveaux. Les tests de surface ont été systématiques, et pour certaines carottes des tests érodimétriques ont été faits à 4 et/ou à 8 cm sous la surface du sédiment. Les comptages de macrofaune benthique ont été réalisés pour 17 d'entre eux, après tamisage (maille de 1 mm).

Le tableau 10 présente l'ensemble des résultats bruts :

- N° station et correspondance dans les autres campagnes de prélèvements Colmatage
- Teneur en eau, bulk density et concentration sèche (dry density)
- Faciès sédimentaire, fractions d'argile, de silts et de vase (issues d'une analyse microgranulométrique)
- Concentration relative de vase, calculée comme la masse de vase rapportée au volume de sédiment non occupé par les sables
- Teneur en matière organique (% en masse)
- Contrainte critique de remaniement du sédiment, issu de la mesure érodimétrique
- Abondances d'organismes benthiques.

La concentration relative de vase est considérée comme le paramètre pertinent représentant l'état de 'consolidation' d'un sédiment mixte sable/vase, considérant que le sable n'intervient pas dans la matrice cohésive du sédiment (Le Hir et al., 2011) ; cette concentration relative  $C_{relva}$  est déduite de la concentration sèche  $C$  et de la fraction de vase ( $frVa$ ) par l'expression :

$$C_{relva} = C.frVa / (1 - (1-frVa)C/\rho_s)$$

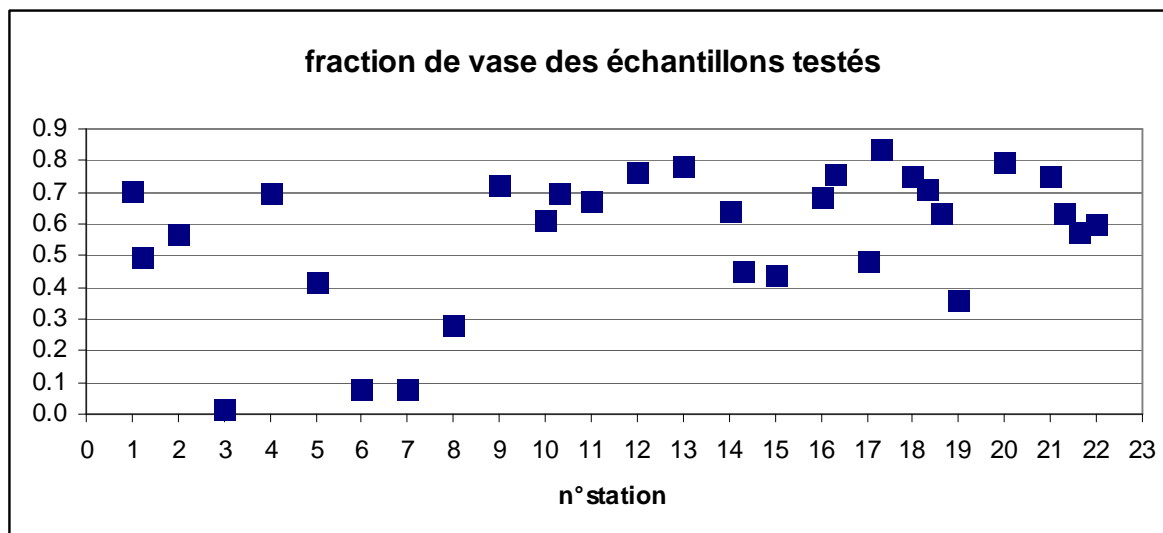
Où  $\rho_s$  est la masse volumique des grains, supposée identique pour les sables et la vase.

Les abondances des différentes espèces benthiques sont exprimées en nombre par surface testée à l'érodimètre. Cette dernière est un disque de 9 cm de diamètre, soit une surface de 0.00636 m<sup>2</sup>. Ces quantités sont donc à multiplier par 157 pour obtenir des densités par m<sup>2</sup>, ou encore par 63 pour obtenir un nombre d'individus par 0.4 m<sup>2</sup>, comme cela a été rapporté pour les campagnes Benthos. Cette opération révèle aussi l'incertitude élevée de ces comptages, les surfaces échantillonnées étant réduites (correspondant à celles soumises à érodimétrie). Le tamisage ayant été réalisé sur le sédiment restant dans l'érodimètre, la numération correspond au contenu des 2 cm superficiels, avec l'éventualité que certain(s) des « petits » organismes ait été emporté au cours du test d'érodimétrie.

La Figure 99 montre que la plupart des échantillons testés étaient des vases sableuses, même si pour certains d'entre eux il s'agissait de sables plus ou moins envasés. L'échantillonnage correspond à la gamme de faciès ciblée, considérant que pour des sables purs ou des graviers, les conditions de remaniement sont assez bien connues et indépendantes des organismes présents.

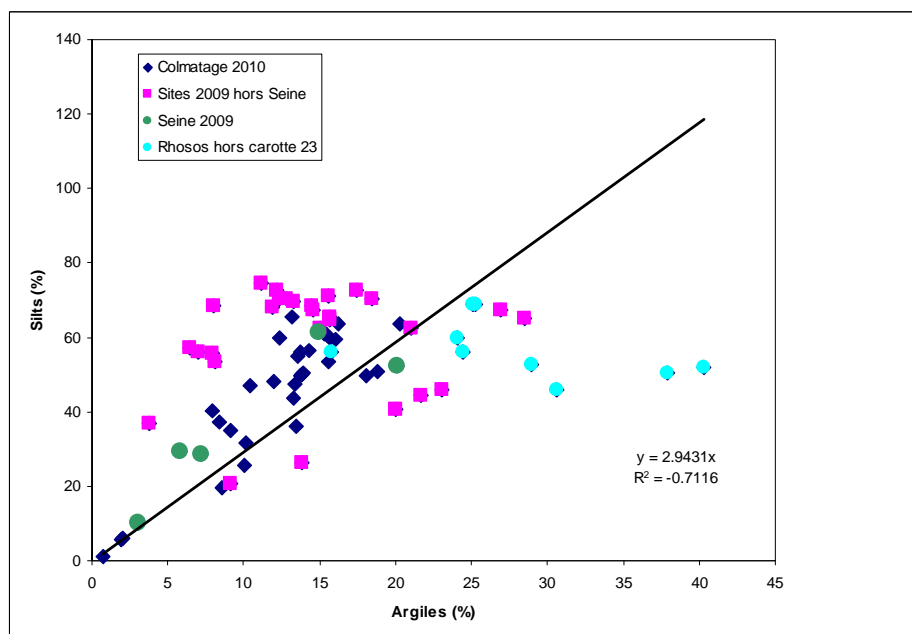
						Granulométrie								comptage faune benthique																	
	N° Station	niveau sous surf.	teneur eau	bulk density	Conc. sèche	type sédiment	fract. argile	fract. Silt	fract. vase	conc. relative vase	teneur mat. Org.	contrainte critique	owenia	abra alba	pholoe baltic	nucula t	mysella b	ophiura o	acrocnida b	tharyx m	nephtys h	asterias r	cereus p	myriochele	tubulanus	mellina p	eteone l	cerastoderma	ensis d	lanice c ?	total
Echantillon		cm	%	(g/l)	(g/l)		%	%	%	g/l	%	(Pa)																			
pt7 Davuin surf car du 26/04/10	1s	0	46.3	1690	1155	Sable envasé	15.6	53.5	0.69	923	2.9	0.36																			
pt7 Davuin surf Reineck du 26/04/10	1s'	0	44.8	1741	1202	Sable envasé	13.5	36.1	0.50	772	3.3	0.57																			
pt5 Davuin surf car du 26/04/10	2s	0	58.6	1636	1031	Sable grossier envasé	13.3	43.5	0.57	704	5.2	0.24																			
pt13 Davuin surf car. du 26/04/10	3s	0	24.0	1968	1587	sable très peu envasé	0.7	1.2	0.02	72	0.5	0.26																			
pt15 Davuin surf car du 26/04/10	4s	0	83.8	1500	816	Vase silteuse	13.7	56.0	0.70	627	4.9	0.67																			
pt16 Davuin surf car du 26/04/10 ?	5s	0	52.2	1676	1101	Sable envasé	10.1	31.6	0.42	606	2.4	0.42																			
pt20 Davuin surf car du 26/04/10	6s	0	28.2	1858	1449	Sable envasé	2.0	6.1	0.08	236	1.1	0.67																			
pt4K3b Davuin surf car du 26/04/10	7s	0	30.5	1893	1450	Sable très peu envasé	1.9	5.8	0.08	225	1.1	0.54																			
pt179 Sandric surf car du 27/04/10	8s	0	46.0	1710	1171	Sable grossier envasé	8.6	19.7	0.28	485	2.5	0.46																			
pt182 Sandric surf car du 27/04/10	9s	0	69.1	1549	916	Vase silteuse	12.4	60.0	0.72	733	3.9	0.31	0	6	1	0	2	0	0	3	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	18
pt13 Sandric surf car du 27/04/10	10s	0	70.6	1554	911	Sable envasé	13.4	47.6	0.61	641	4.2	0.63	1	8	1	1	2	1	1	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28
pt13 Sandric 4 cm car du 27/04/10	10	4	71.4	1576	920	Vase sableuse	18.9	50.7	0.70	715	5.5	8.90	0	0	1	0	0	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	6
pt23 Sandric surf car du 27/04/10	11s	0	86.7	1475	790	Vase silteuse	18.1	49.5	0.68	591	3.3	0.53	6	0	0	2	0	1	0	3	0	0	2	5	1	0	0	0	0	0	20
pt15 Sandric surf car du 27/04/10	12s	0	104.6	1434	701	Vase silteuse	15.3	61.2	0.76	572	7.2	0.36	1	0	1	5	6	6	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	24
pt56 Sandric surf car du 29/04/10	13s	0	171.4	1263	465	Vase silteuse fluide	13.2	65.4	0.79	380	7.9	0.23	1	4	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
pt96 Sandric surf car du 29/04/10	14s	0	52.2	1651	1085	Sable fin envasé	13.9	50.6	0.65	819	3.3	0.70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	0	7
pt96 Sandric 4 cm car du 29/04/10	14	4	44.0	1720	1194	Sable envasé	8.4	37.1	0.45	720	2.2	0.74																			0
pt126 Sandric surf car du 29/04/10	15s	0	58.6	1631	1029	Sable envasé	9.2	35.0	0.44	579	2.2	0.18	0	0	0	0	2	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
pt104 Sandric surf car du 29/04/10	16s	0	109.9	1443	687	Vase silteuse	13.5	55.1	0.69	513	4.6	0.28																			0
pt104 Sandric 4 cm car du 29/04/10	16	4	85.7	1445	778	vase silteuse	15.5	60.7	0.76	638	6.1	3.22																			0
pt103 Sandric surf car du 30/04/10	17s	0	64.3	1627	990	Vase sableuse oxydée	7.9	40.3	0.48	591	3.9	0.16	8	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	14
pt103 Sandric 4 cm car du 30/04/10	17	4	75.8	1470	836	Sable envasé	20.3	63.6	0.84	739	3.9	1.31	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
pt91 Sandric surf car du 30/04/10	18s	0	158.5	1302	504	Vase silteuse fluide	16.0	59.4	0.75	399	7.8	0.16	10	2	0	0	0	0	6	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
pt91 Sandric 4 cm car du 30/04/10	18	4	82.7	1406	770	Vase silteuse fine	14.3	56.5	0.71	595	5.2	1.24	8	0	0	0	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
pt91 Sandric 12 cm car du 30/04/10	18	12	49.7	1705	1139	Vase sableuse fine	13.7	49.8	0.64	858	4.2	2.29																			0
pt74 Sandric surf car du 30/04/10	19s	0	56.1	1632	1045	Vase sableuse fine	10.1	25.8	0.36	501	3.4	1.06	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6
pt Ratelets surf car du 30/04/10	20s	0	86.4	1490	799	Vase silteuse	16.2	63.5	0.80	679	4.8	0.20	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4
pt55 Sandric surf car du 30/04/10	21s	0	127.0	1374	605	Vase silteuse fluide	15.7	59.9	0.76	485	6.4	0.18	2	3	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
pt55 Sandric 4 cm car du 30/04/10	21	4	106.2	1391	675	Vase silteuse	13.9	49.9	0.64	474	8.3	1.73	2	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
pt55 Sandric 8 cm car du 30/04/10	21	8	55.8	1575	1011	Vase silteuse	10.4	47.1	0.58	694	3.1	0.74																			0
pt120 Sandric surf car du 29/04/10	22s	0	88.9	1450	768	Vase sableuse	12.0	48.1	0.60	521	5.3	0.63	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Tableau 2. Caractéristiques des échantillons testés par érodimétrie (campagne COLMATAGE 2010)



**Figure 99.** Fraction de vase des échantillons testés.

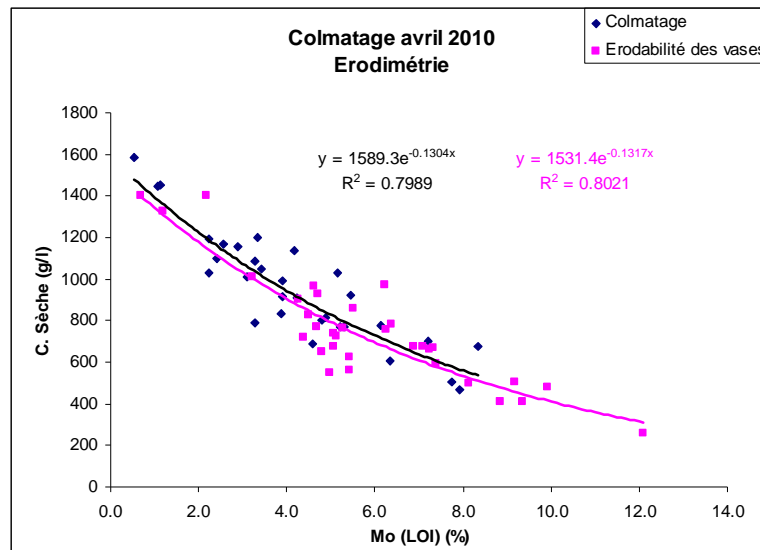
Le rapport silt/argile a été considéré pour les échantillons de la campagne COLMATAGE, et remplacé par rapport aux échantillons ayant fait l'objet de tests analogues (Cann, 2010) : on observe que ce rapport est d'environ 3,5 (Figure 100), ce qui situe les échantillons COLMATAGE 2010 dans la moyenne de nos observations (autrement dit, le rapport argile/vase est d'environ 22 %, et relativement homogène dans l'embouchure de la Seine.



**Figure 100.** Rapports silts/argiles pour un certain nombre d'échantillons de vases et vases sableux dans les eaux côtières de France métropolitaine.

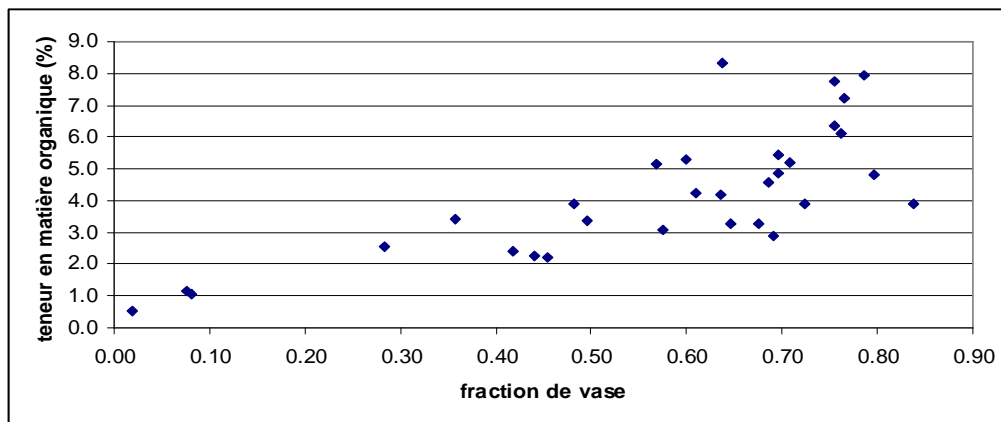


Les concentrations sèches de nos échantillons (Figure 101) sont assez élevées, compte tenu de la présence de sables, lorsqu'on les compare à la gamme de concentrations obtenues.



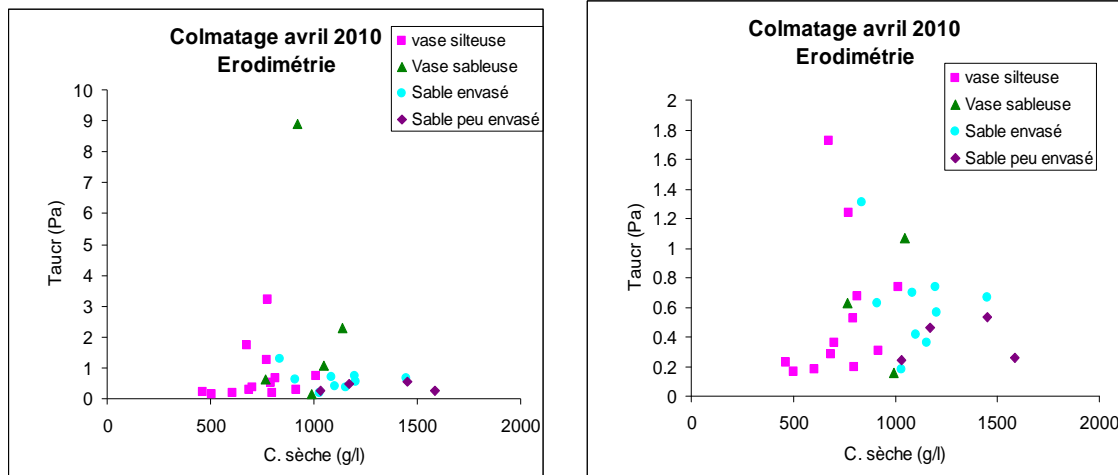
**Figure 101.** Relation entre concentration sèche (g/l) et teneur en matière organique (par perte au feu).

Les teneurs en matière organique (MO) sont assez dispersées, ce qui est normal puisque la fraction sableuse est a priori moins organique. Cependant la Figure 102 montre que pour des valeurs élevées de la fraction de vase, la teneur en matière organique est très variable, entre 3 et 8 %. En raison d'une probable dépendance de l'érodabilité des sédiments en fonction de leur teneur en matière organique (Cann, 2010), il serait intéressant de poursuivre la caractérisation (et la cartographie) de la teneur en matière organique des fractions vaseuses en baie de Seine orientale.



**Figure 102.** Teneur en matière organique (par perte au feu) en fonction de la fraction de vase, pour les échantillons de la campagne d'érodabilité COLMATAGE 2010.

Il est classique de relier l'érodabilité des vases en fonction de la concentration sèche (e.g. Migniot, 1968). La Figure 103 montre que cette relation est peu respectée pour les sédiments de la campagne COLMATAGE, même en écartant les échantillons sableux.



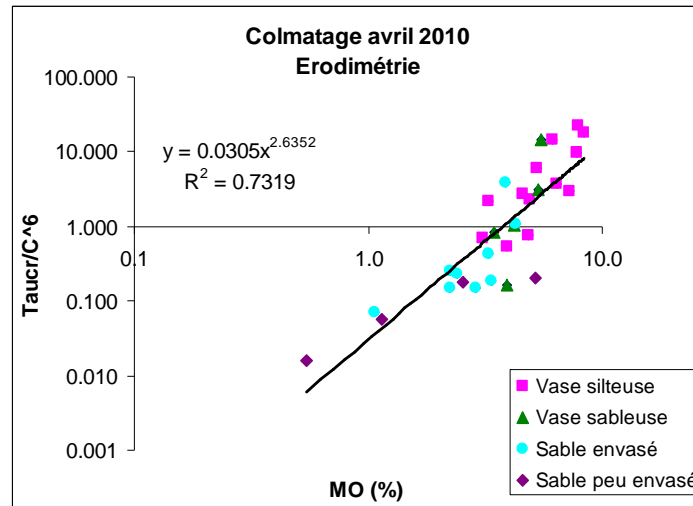
**Figure 103.** Campagne COLMATAGE 2010 en baie de Seine orientale. Représentation de la contrainte critique d'érosion en fonction de la concentration sèche (à droite : zoom de la figure de gauche).

Par contre, l'érodabilité des sédiments semble corrélée à la teneur en matière organique (Fig. 104). Reprenant le raisonnement suivi par Cann (2010) sur la double dépendance de l'érodabilité en fonction de la concentration sèche (élevée à la puissance 6, comme suggéré par Migniot, 1968 et 1989) et de la teneur en matière organique, une formulation de la contrainte critique en fonction de ces 2 paramètres peut être proposée :

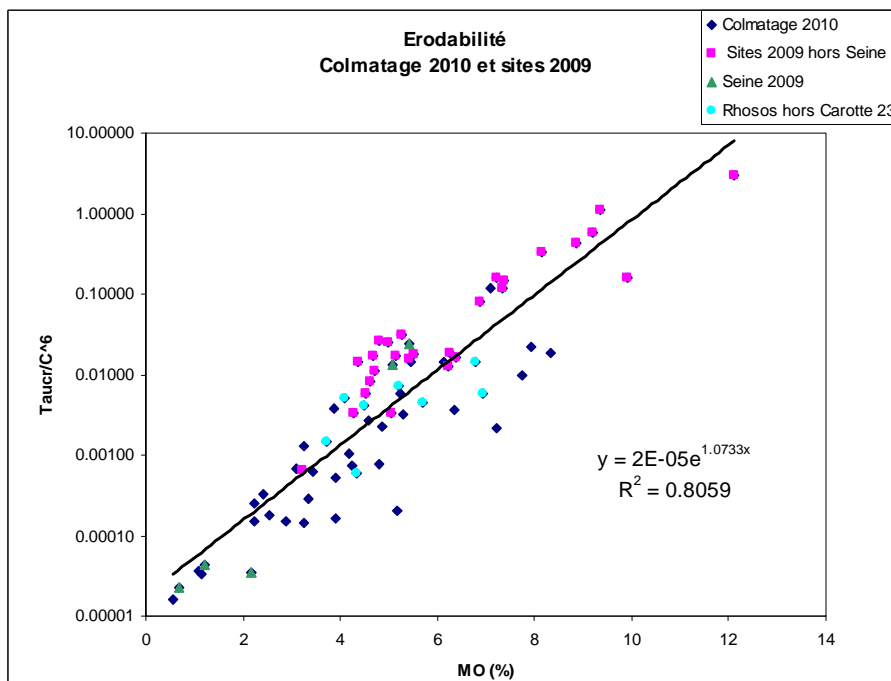
$$\tau_{cr} = 0.03 \cdot C_{relva}^6 \cdot MO^{2.635}$$

Il est remarquable, et étonnant, de constater que la relation semble raisonnablement correcte, tant pour les échantillons vaseux que ceux à dominante sableuse.

Les résultats obtenus en baie de Seine orientale ont été resitués par rapport à ceux obtenus en d'autres sites de la façade métropolitaine (Figure 105). Les mesures devant la Seine prolongent de façon satisfaisante vers les valeurs faibles les résultats obtenus auparavant sur ces autres sites. Il semblerait donc que la résistance au cisaillement plutôt faible des vases de Seine serait due à leur faible teneur en matière organique.



**Figure 104.** Relation entre la contrainte d'érosion critique rapportée à la puissance 6 de la concentration et la teneur en matière organique.



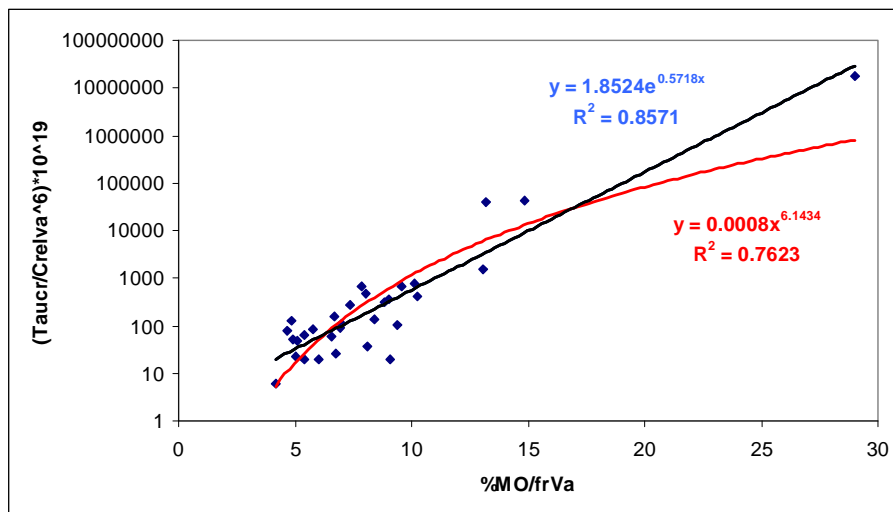
**Figure 105.** Relation entre la contrainte d'érosion critique, rapportée à la puissance 6, de la concentration et de la teneur en matière organique, pour un ensemble d'échantillons des eaux côtières de France métropolitaine.

Enfin, pour tenter de mieux représenter la faible part des fractions sableuses dans la caractérisation de l'érodabilité des vases, une relation faisant intervenir la concentration relative de vase plutôt que la concentration sèche totale a été recherchée. Elle peut s'écrire :

$$\tau_{cr} = a.C_{relva}^6.exp(0.57 MO/frVA)$$

avec : frVA : fraction de vase,  
 Crelva : concentration relative de vase  
 a : une constante de régression, évaluée à  $1.85 \cdot 10^{-19}$

C'est ce que représente la Figure 106. Le résultat peut paraître séduisant, mais il faut en relativiser la portée, car le coefficient de régression assez élevé résulte de la dynamique d'échelle de l'expression  $\tau_{cr} / C_{relva}^6$

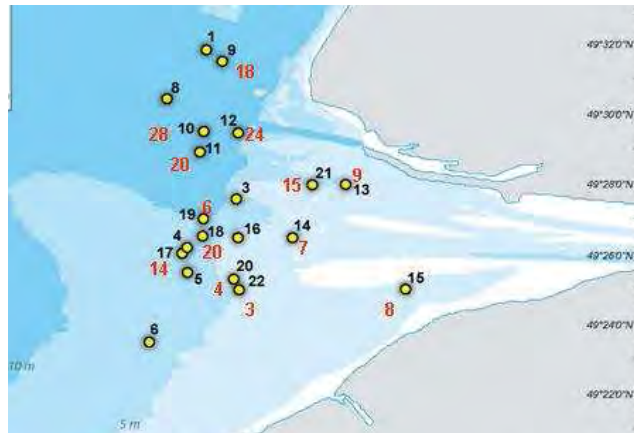


**Figure 106.** Relation entre la contrainte d'érosion critique rapportée à la puissance 6 de la concentration relative de vase et la teneur en matière organique rapportée à la fraction vaseuse, pour les échantillons de sédiments de l'embouchure de la Seine testés dans le cadre de la campagne COLMATAGE 2010.

### *Contribution des organismes benthiques à l'érodabilité des sédiments de l'embouchure de la Seine.*

Les espèces dénombrées dans les échantillons testés à l'érodimètre sont reportées dans le tableau 2 et présentées en Figures 107 et 108. Les ordres de grandeur sont entre 5 et 30 individus par échantillon, soit 32 à 1900 ind./0.4 m<sup>2</sup>, pour des strates de sédiment superficiel de 2 cm d'épaisseur. Ces résultats semblent correspondre à des abondances un peu inférieures à celles indiquées dans le chapitre « benthos ». Leur répartition géographique en fonction des

stations est donnée par la Figure 107. On relève un maximum de densité sur une « couronne » périphérique des bancs d'embouchure.

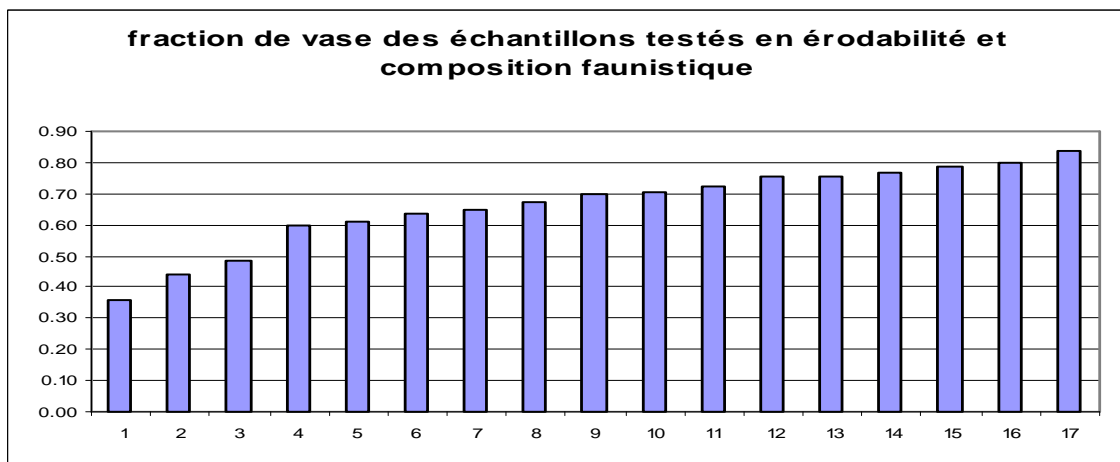
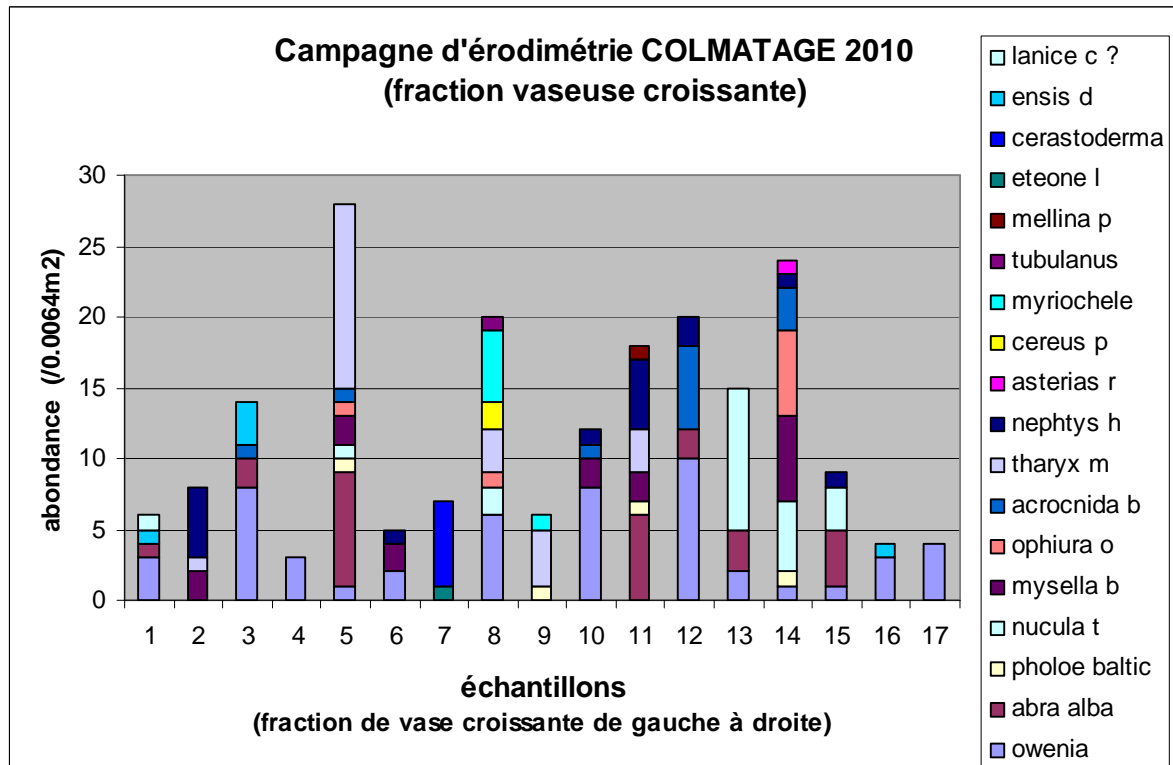


**Figure 107.** Report des comptages de benthos (abondance totale) effectués sur les échantillons de surface sur les stations de carottages.

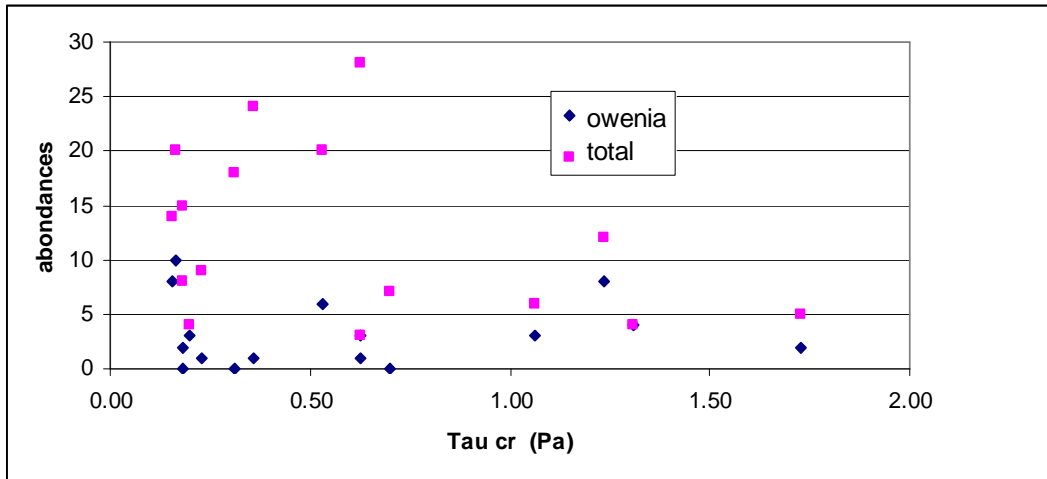
Les abondances de chaque espèce sont présentées sur la Figure 108, en ordonnant les échantillons par teneur en vase croissante de la gauche vers la droite. On n'observe pas de corrélation entre abondance totale et teneur en vase. Cela ne semble pas non plus le cas pour les abondances par espèces : ce constat sans doute étonnant s'explique peut-être par une variation modérée de la fraction vaseuse dans les échantillons concernés (pour des raisons pratiques, les stations plus sableuses n'ont pas fait l'objet d'un comptage d'organismes).

La Figure 109 montre l'absence de corrélation évidente entre la présence d'organismes benthiques et la contrainte critique d'érosion. Cette observation faite sur les abondances totales est encore plus vraie si l'on considère l'espèce ingénieur *Owenia fusiformis*.

Toutes les recherches de relations entre comportement physique et comptage de benthos ont été vaines, sur la base des échantillons analysés (soit seulement 17 au total). Ainsi la figure 110 présente les abondances totales ou celles relatives à l'espèce *Owenia fusiformis* positionnées sur le diagramme de la Figure 106 montrant une relation entre le ratio  $\tau_{cr} / C_{relva}^6$  et la teneur en matière organique rapportée à la fraction de vase. L'examen des comptages d'organismes n'apporte pas d'éclairage sur l'écart à une apparente corrélation entre ces deux paramètres.

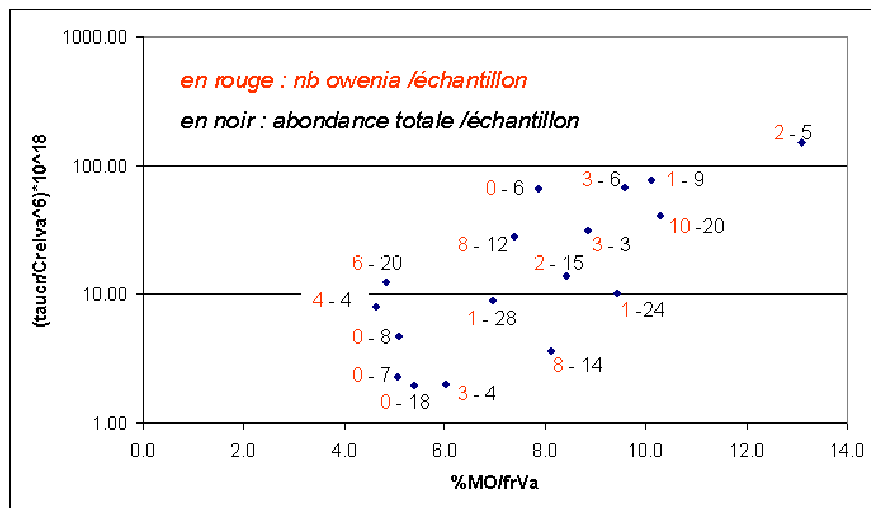


**Figure 108.** Abondance des divers organismes benthiques mis en évidence dans les échantillons de la campagne COLMATAGE soumis aux tests d'érodabilité en canal. En bas : teneurs en vase des échantillons correspondants (attention ! : ce ne sont pas les N<sup>os</sup> de stations)



**Figure 109.** Correspondances entre abondance totale ou relative à l'espèce *owenia fusiformis* et la contrainte critique d'érosion.

Toutes les recherches de relations entre comportement physique et comptage de benthos ont été vaines, sur la base des échantillons analysés (soit seulement 17 au total). Ainsi la Figure 110 présente les abondances totales ou celles relatives à l'espèce *Owenia fusiformis* positionnées sur le diagramme de la Figure 106 montrant une relation entre le ratio  $\tau_{cr} / C_{relva}^6$  et la teneur en matière organique rapportée à la fraction de vase. L'examen des comptages d'organismes n'apporte pas d'éclairage sur l'écart à une apparente corrélation entre ces deux paramètres.



**Figure 110.** Abondances totales et comptages d'*Owenia fusiformis* rapportés sur le diagramme de la Figure 106.



Il est sans doute prématuré de conclure par l'absence d'effet des organismes sur l'érodabilité des sédiments. Le nombre d'échantillons reste trop faible pour valider ce constat. Cependant la grande hétérogénéité des habitats de l'embouchure de la Seine, et leur variabilité annuelle ou saisonnière, voire événementielle, n'incite guère à préconiser de réitérer l'exercice en ciblant l'ensemble des faciès sablo-vaseux. Il se trouve que les contraintes critiques qui résultent des tests érodométriques ne varient pas dans une gamme très large, et restent modérées devant les contraintes exercées par les courants de marée de vive eau, et surtout bien inférieures aux contraintes exercées par les vagues de tempête. Ces sédiments sablo-vaseux sont donc fréquemment remaniés, comme l'attestent les mesures d'érosion/dépôt par Altus, et la campagne d'érodométrie de COLMATAGE, la première opérationnelle en baie de Seine orientale, vient confirmer ces observations.

Par contre, il nous paraîtrait judicieux de procéder à une campagne spécifique sur les vases très consolidées reliques affleurant dans la partie sud de l'embouchure, qui sont susceptibles d'être remaniées et déstructurées par des organismes bioturbateurs. Ce type de vase ne peut être érodée par un courant de marée, et son remaniement ne peut résulter que d'un processus de liquéfaction par les vagues (Silva Jacinto et Le Hir, 2001) ou d'un processus de bioturbation.

## 7.6. Synthèse – Conclusions

### **Rappel des objectifs**

De façon à mieux connaître la stabilité des biotopes de l'embouchure de la Seine, il était proposé de décrire la variabilité morphosédimentaire en quelques secteurs clés de l'embouchure de la Seine et les facteurs principaux de cette variation, qu'ils soient d'origine physique ou d'origine biologique. En particulier, il s'agissait de rechercher un éventuel impact des organismes benthiques sur le comportement physique du sédiment superficiel, pouvant le cas échéant expliquer pour partie la variabilité des faciès sédimentaires (puisque les peuplements benthiques expriment une très grande variabilité d'abondance) et conduire à des mécanismes de couplage entre dynamique de ces peuplements et variations morphosédimentaires.

## Actions réalisées

Si la distribution spatiale des paramètres hydro-morpho-sédimentaires à l'embouchure de la Seine est relativement bien connue, les observations récentes faites dans le cadre du Programme Scientifique Seine-Aval avaient montré que cette distribution variait fortement au gré des forçages physiques, peut-être plutôt de manière événementielle que saisonnière (cf Lesueur et al, Fascicule Seine-Aval N°3, sur les sédiments). Mais les observations réalisées par campagnes étalées dans le temps ne permettaient pas d'affecter une échelle temporelle aux variations constatées.

Pour préciser les processus de dépôt et remise en suspension dans le secteur des bancs d'embouchure, des systèmes ALTUS, échosondeurs autonomes capables de mesurer en continu l'évolution locale du niveau de sédiment avec une précision de quelques millimètres) ont été déployés en deux campagnes :

- de septembre 2008 à juin 2009, deux stations en zone subtidale, l'une au nord de l'engainement dans le « triangle des épaves », l'autre sur le site des Ratelets à l'ouest du banc du Ratier ; ce point Ratelets est considéré comme représentatif d'un large secteur, et peu influencé à court terme par les forçages anthropiques tels que les pratiques de dragages ; il est remarqué qu'il s'agissait des premières mesures altimétriques en continu en zone subtidale dans le secteur, réalisées avec succès grâce à la ténacité d'une équipe de plongée intervenant par visibilité nulle ; une troisième station a été placée en intertidal dans le secteur de la Fosse Nord, entre le chenal Nord et la digue basse Nord, où l'impact de la construction de Port 2000 se fait encore sentir
- de septembre 2010 à mai 2011, deux stations ont été placées de part et d'autre du banc du Ratier, l'une à l'est en bordure de fosse Nord, l'autre à l'ouest, toujours aux Ratelets, de façon à pouvoir « relier » les deux campagnes de mesures et pour la bonne représentativité de ce point de mesure, qui en particulier peut révéler les modulations de la progradation du banc du Ratier (celle du banc d'Amfard au Nord étant surtout influencée par le rejet de dragages du Kannig).

Les faciès sédimentaires investigués sont sablo-vaseux pour les deux stations ouest (Ratelets et Triangle des épaves) et vaseux pour les stations est (avec passées sableuses en Fosse Nord). Les systèmes ALTUS possèdent un capteur de pression pour mesurer la hauteur d'eau, et donnent accès aux surcotes si l'on connaît par ailleurs la pression atmosphérique. Mais les possibilités d'acquisition de salves à haute fréquence (4 minutes à 2 Hz toutes les 16')

pendant plusieurs mois permettent de mesurer les vagues locales, et d'en produire un spectre d'énergie. Ainsi des mesures de climat de vagues dans les différentes stations ont été obtenues, constituant une base de données unique pour la calibration et la validation de modèles de génération/propagation/dissipation des vagues en baie de Seine orientale. Il a été vérifié que la variabilité des forçages climatiques (vents en baie de Seine et débit de la Seine) et tidaux (amplitudes des marées) pendant les périodes de mesure était bien représentative de celle observée depuis une quinzaine d'années.

En ce qui concerne l'effet des organismes sur le comportement des sédiments, une campagne d'érodimétrie quasi *in situ* a été réalisée pendant la 2<sup>ème</sup> partie du projet (avril 2010). Vingt deux carottages ont été réalisés en des points sélectionnés avec le concours des benthologues (N. Desroy et J.C. Dauvin), en essayant de cibler une variation des faciès sédimentaires (fournie par S. Lesourd) et une diversité d'abondance des peuplements benthiques. Les faciès purement sableux ou graveleux étaient écartés, les conditions de remaniement de ces sédiments non cohésifs étant connues et a priori indépendantes de la faune benthique. Les mesures d'érodabilité (contraintes critiques de remaniement et flux d'érosion) ont été réalisées à l'aide de l'érodimètre Ifremer installé au Havre dans les locaux de la cellule de Suivi du Littoral Haut-Normand, tandis que les mesures sédimentologiques d'accompagnement (granulométrie, densité et concentration, teneur en matière organique, rhéométrie) ont été faites a posteriori dans les laboratoires d'Ifremer-Brest. Les comptages de faune benthique ont été faits à Ifremer-Dinard par N. Desroy. Les abondances obtenues sont à peu près représentatives de celles habituellement observées dans le secteur d'embouchure de la Seine.

## **Résultats majeurs**

### ***Variabilité morphosédimentaire***

Des quatre sites instrumentés, celui des Ratelets est le plus dynamique pour ses variations altimétriques. Les épisodes d'érosion, parfois brutaux, comme les épisodes de dépôts significatifs interviennent tous en conjonction avec des vagues importantes, en général corrélées à des vents de secteur ouest qui les génèrent. En particulier une érosion exceptionnelle de 30 cm a pu être observée sous l'effet de vagues de hauteur significative ( $H_s$ ) de 3 m, intervenant peu après une tempête de 4-5 jours qui avait généré des vagues atteignant 2,5 m ( $H_s$ ). Il semblerait qu'un phénomène de liquéfaction soit intervenu, le sédiment constitué de sables fins (légèrement envasés) ayant perdu sa structuration sous

l'effet du cisaillement oscillant généré par les vagues voit sa viscosité apparente diminuer fortement (thixotropie). Le « rechargement du site » en trois mois, mais principalement au cours d'épisodes de vagues, est remarquable. On peut généraliser ces observations : dans tous les secteurs sablo-vaseux, des variations rapides du sédiment (typiquement de l'ordre de la dizaine de cm) sont observées, la plupart du temps suivies de dépôts du même ordre de grandeur, intervenant lors de tempêtes ultérieures. La dominance des vagues comme agent de remaniement de ces fonds sablo-vaseux est indéniable (même dans l'environnement macro-tidal de l'embouchure de la Seine), et puisqu'en un point donné des tempêtes de même secteur sont susceptibles d'entraîner érosion ou dépôt, il semblerait que les tempêtes provoquent des érosions et dépôts distribués spatialement, les sédiments sableux se redéposant très rapidement. Les schémas de transports n'ont pas été élucidés par nos seules observations ponctuelles, d'autant moins que les évolutions résiduelles sont faibles. Toujours sur le site des Ratelets où les observations sont les plus longues, une stabilité avait été constatée en 2008-2009 tandis qu'une érosion résiduelle d'une vingtaine de cm a été observée en 2010-2011. Ces tendances à une légère érosion sur ce point central du front ouest du banc du Ratier semble révéler une stabilisation voire une régression temporaire du banc du Ratier, observation qu'il conviendrait de confirmer avec les cartes de différentiels bathymétriques. Au passage, on observe que ces évolutions semblent indépendantes du débit de la Seine (une crue de  $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pendant près d'un mois n'a pas d'effet visible sur la tendance résiduelle). Enfin, on relève que l'effet des marées n'a été mis en évidence que pour les fortes vives-eaux. En Fosse Nord, un engraissement résiduel de 16 cm en 9 mois sur le site instrumenté a été observé : ce dépôt se produit principalement au cours des périodes de calme. Pour ce site, les mesures de vagues mettent en évidence un amortissement de l'ordre de 50-60% par rapport aux stations externes.

Le site du Ratier sud-est enregistre une érosion résiduelle de 10 cm en 7 mois de mesures. Les variations du niveau de sédiment au cours d'épisodes de vagues y sont plus atténuées que sur le flanc ouest du banc du Ratier. Les vents de SE comme ceux d'ouest sont susceptibles de générer des érosions, tandis que les dépôts interviennent au cours de tempêtes d'ouest (par exemple lorsqu'une érosion est observée aux Ratelets).

### ***Erodabilité du sédiment et rôle de la faune benthique***

Les mesures d'érodabilité ont été réalisées sur des faciès s'étalant entre sables légèrement envasés (~ 5% vase) et vases sableuses (84% vase). Globalement, les valeurs des contraintes

critiques de resuspension sont un peu inférieures à la gamme de variation observée dans notre laboratoire avec le même instrument sur un ensemble de sites français (façades Manche-Atlantique et méditerranéenne).

Une forte dépendance en fonction de la teneur en matière organique est observée, en gardant cependant à l'esprit que cette fraction organique et la fraction de vase sont corrélées. Le modèle d'érosion proposé par P. Cann (2010) est confirmé par les mesures de la campagne COLMATAGE 2010 (première campagne opérationnelle de mesures érodométriques en baie de Seine orientale), et a pu être étendu en introduisant la concentration relative de vase ( $C_{relva}$ ), c'est à dire la concentration de particules d'argiles ou de silts dans l'espace non occupé par les sables, qui constitue le paramètre caractérisant la matrice cohésive d'un sédiment mélangé sable/vase. Cette loi d'érosion s'écrit :

$$\tau_{cr} = a.C_{relva}^6.exp(0.57 MO/frVA)$$

avec : MO : teneur en matière organique

frVA : fraction massique de vase

a : constante ( $= 0.2. 10^{-18}$ )

Le rôle des organismes n'a pu être véritablement mis en évidence. Malgré un échantillonnage réalisé dans une gamme de variation représentative des habitats de l'embouchure, tant sur le plan des faciès sédimentaires (entre vases et sables envasés à 35%) que des biocénoses, aucune corrélation n'a pu être établie entre les abondances globales ou par espèce et les caractéristiques des sédiments, en particulier leur érodabilité. Ainsi la contribution du polychète *owenia fusiformis*, espèce ingénieuse très présente en baie de Seine orientale et dans nos échantillons testés n'a pas été mise en évidence.

Une première conclusion pourrait être que dans les environnements sablo-vaseux qui dominant l'embouchure de la Seine, la variabilité de la contrainte critique d'érosion (en général inférieure à 2 Pa) n'est pas très élevée devant la variation des contraintes exercées par les vagues, qui sont donc suffisantes pour remanier le sédiment. Les organismes présents ne semblent pas susceptibles de modifier ce résultat. Il en va sans doute autrement des vases fossiles indurées qui affleurent à certains endroits, et dans ce cas la présence d'organismes bioturbateurs pourrait modifier le comportement du sédiment.

## ANNEXES

### ANNEXE 1 : Les mesures altimétriques ALTUS

**Durant « COLMATAGE 1 » 2008-2009 (figure 1):**

Mise en place de 2 stations de mesures altimétriques ALTUS, à l'embouchure, en domaine subtidal :

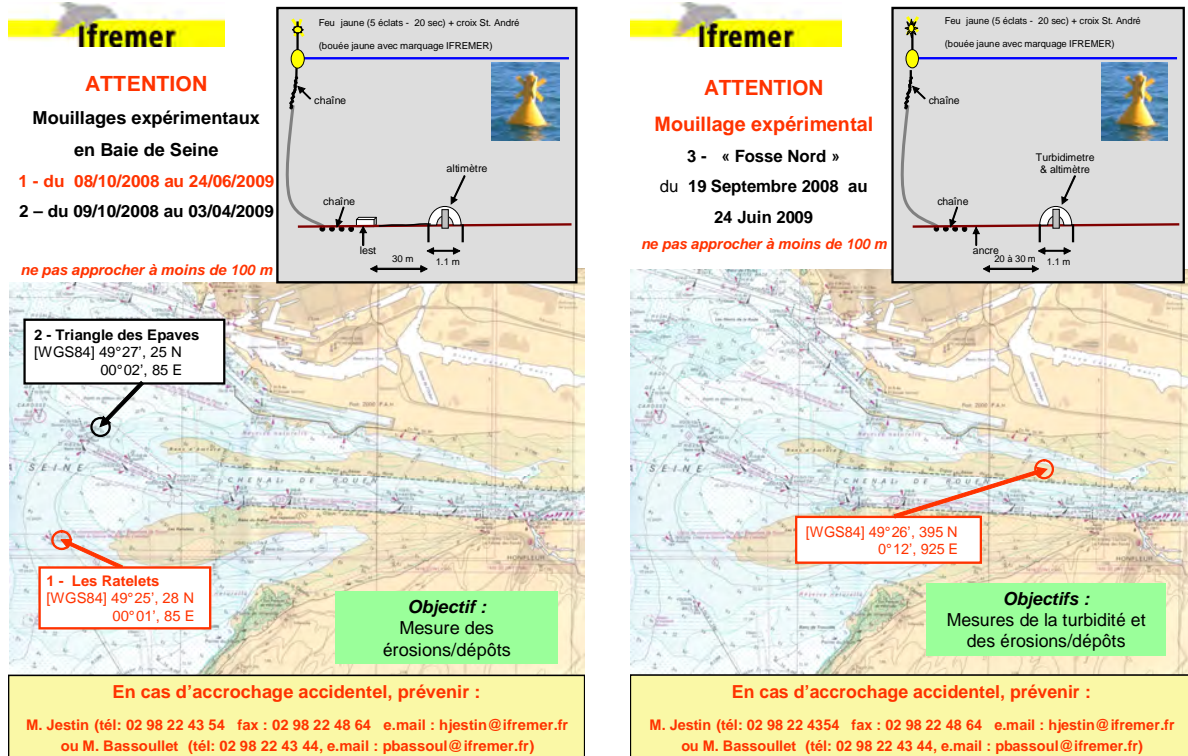


Figure 1 : Affiches pour autorisations de mouillage des trois stations de mesures 2008-2009

#### Localisation des stations

- a) Station « **Bouée des Ratelets** » [WGS 84 : 00° 01', 85 E ; 49° 25', 28 N]  
Durée des enregistrements : 08/10/2008 au 24/06/2009.  
Interruption dans les mesures : du 02/04/2009 au 07/05/2009 (ALTUS relevé/vérification et remise en état de la station)
- b) Station « **Triangle des Epaves** » [WGS 84 : 00° 02', 85 E ; 49° 27', 25 N]  
Durée des enregistrements : 09/10/2008 au 03/04/2009.  
Interruption dans les mesures : la station ayant été chalutée, seule une partie des données, du 09/10/2008 au 15/02/2009, est exploitable.

Mise en place d'une station de mesures altimétriques ALTUS, en domaine intertidal, en fosse Nord, sur la vasière adossée à la digue basse Nord :

- c) Station « **Fosse Nord** » [WGS 84 : 00° 12', 93 E ; 49° 26', 40 N]  
Durée des enregistrements : **Altimétrie** – du 19/09/2008 au 24/06/2009,  
**Turbidité** (turbidimètre mis en place sur cette station pour les besoins de validation liés au projet « MODEL ») - du 19/09/2008 au 12/02/2009.  
Interruption dans les mesures : la station ayant basculé, seules les données altimétriques de la période du 19/09/2008 au 14/01/2009 et du 12/02/2009 (*après remise en place de la station*) au 24/06/2009, sont exploitables.

NB. : Parallèlement et pour les besoins du projet MODEL (validation réactualisée du modèle de bouchon vaseux), des enregistrements de turbidité, conductivité, pression et température ont été réalisés du 18/09/2008 au 12/02/2009, aux 3 stations **Marel Honfleur** [WGS 84 : 00°

14', 00 E ; 49° 25', 69 N], **Fatouville** [WGS 84 : 00° 19', 00 E ; 49° 25', 98 N] et à la station de la **Fosse Nord**, instrumentée pour les mesures altimétriques (voir localisation ci-dessus).

**Durant « COLMATAGE 2 » 2010-2011 (figure 2) :**

En complément à ces tests COLMATAGE 2, l'étude des corrélations entre variations morpho-sédimentaires et forçages physiques a été poursuivie au sein du projet « MODEL 2 » par la mise en place de **2 stations de mesures altimétriques ALTUS**, à l'embouchure, en domaine subtidal (figure B-5) :

- a) Station « **Bouée des Ratelets** » [WGS 84 : 00° 01', 94 E ; 49° 25', 26 N]  
Durée des enregistrements : 08/09/2010 au 26/01/2011 et 26/01/2011 au 11/05/2011 (*non exploitable dans sa totalité pour cause de fouling important par fixation de balanes*)
- b) Station « **Ratier SE** », en fosse Sud [WGS 84 : 00° 06', 51 E ; 49° 24', 83 N]  
Durée des enregistrements : 09/09/2010 au 09/12/2010 et 09/12/2010 au 11/05/2011 (*également non exploitable dans sa totalité pour la même cause*)

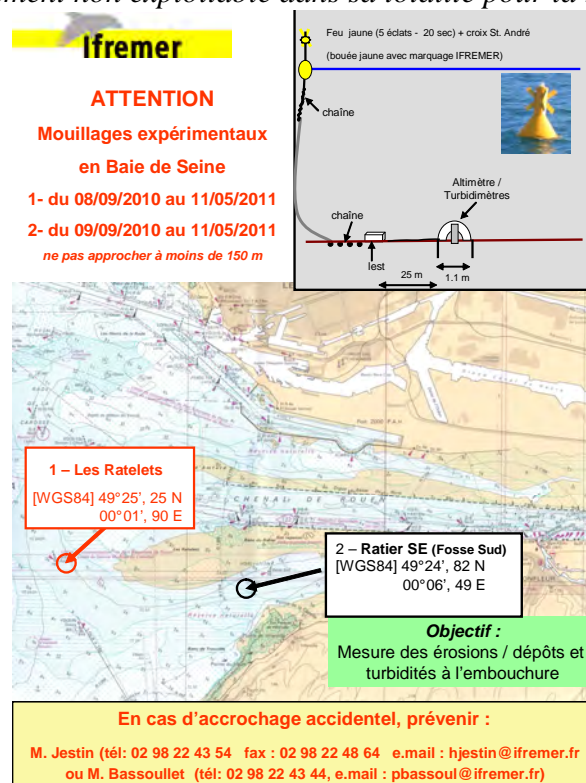


Figure 2 : Affiche pour l'autorisation de mouillage des deux stations de mesures 2010-2011

Localisation des stations



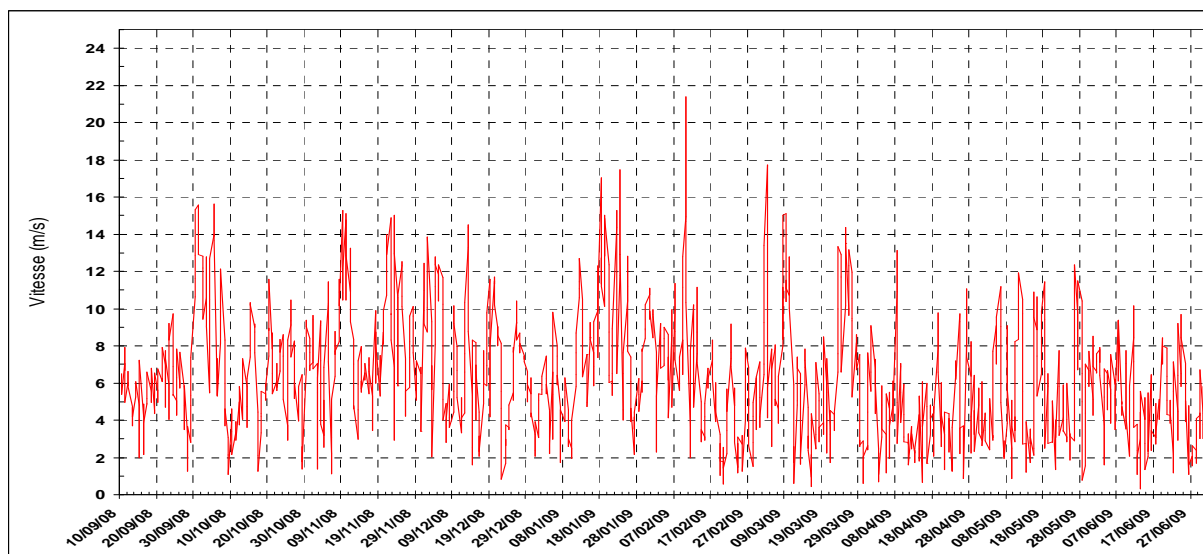
## ANNEXE 2 : La campagne de carottages pour tests érodométriques des sédiments

Lors de la mission embarquée de COLMATAGE 2 (N/O « Côtes de la Manche »), du 25 au 30 avril 2010, 22 carottages ont été réalisés (positionnement des stations dans le tableau ci-dessous). Les correspondances dans la nomenclature de ces stations – habituellement échantillonnées par les benthologues - sont données en dernières colonnes du tableau

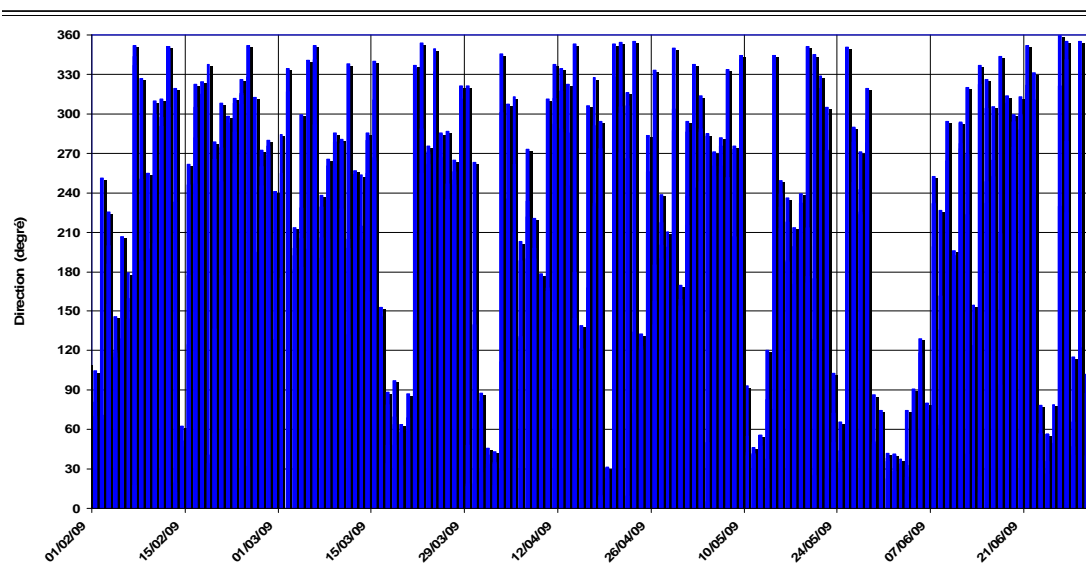
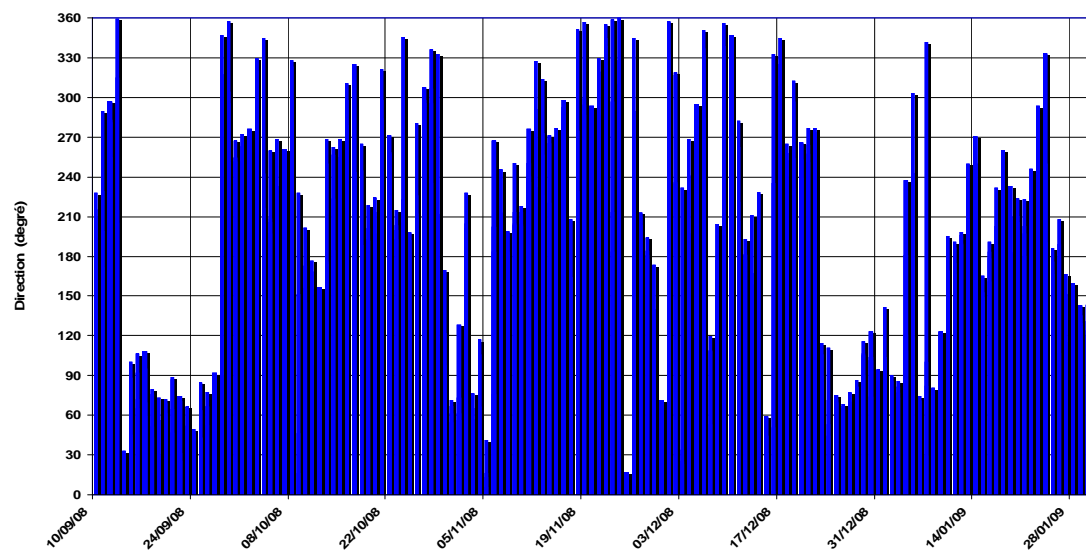
N° Station	Latitude (WGS84)	Longitude (WGS84)	Correspondance Stat. Dauvin	Correspondance Stat. Lesourd
1	49° 31', 860 N	00° 01', 086 E	7	
2	49° 33', 610 N	00° 03', 393 E	5	
3	49° 27', 605 N	00° 01', 906 E	13	
4	49° 26', 160 N	00° 00', 543 E	15	
5	49° 25', 480 N	00° 00', 557 E	16	
6	49° 23', 490 N	00° 00', 500 W	20	
7	49° 28', 269 N	00° 08', 189 W	AK8b	
8	49° 30', 473 N	00° 00', 007 W		S179(C305)
9	49° 31', 543 N	00° 01', 526 E		S182(C311)
10	49° 29', 518 N	00° 01', 015 E		S13 (C240)
11	49° 28', 944 N	00° 00', 912 E		S23 (C241)
12	49° 29', 493 N	00° 01', 989 E		S15 (C237)
13	49° 28', 000 N	00° 04', 955 E		S56
14	49° 26', 492 N	00° 03', 465 E		S96
15	49° 25', 001 N	00° 06', 613 E		S126
16	49° 26', 490 N	00° 02', 000 E		S104
17	49° 26', 042 N	00° 00', 441 E		S103(C29)
18	49° 26', 522 N	00° 00', 956 E		S91 (C107)
19	49° 27', 018 N	00° 00', 991 E		S74 (C115)
20	49° 25', 300 N	00° 01', 850 E		S294
21	49° 27', 989 N	00° 04', 018 E		S55 (C286)
22	49° 25', 000 N	00° 02', 000 E		S120

Position et nomenclature des carottages réalisés lors de la campagne "COLMATAGE 2"

### ANNEXE 3 : Vitesse et direction des vents - Période Septembre 2008 – Juin 2009

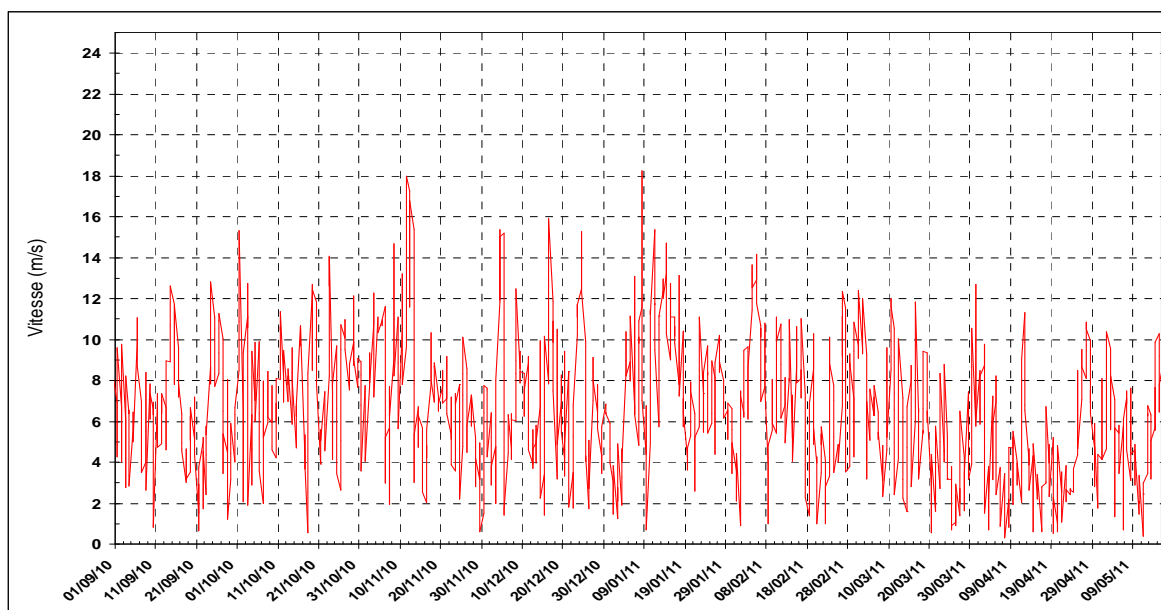


Vitesse des vents (en  $\text{m.s}^{-1}$ )

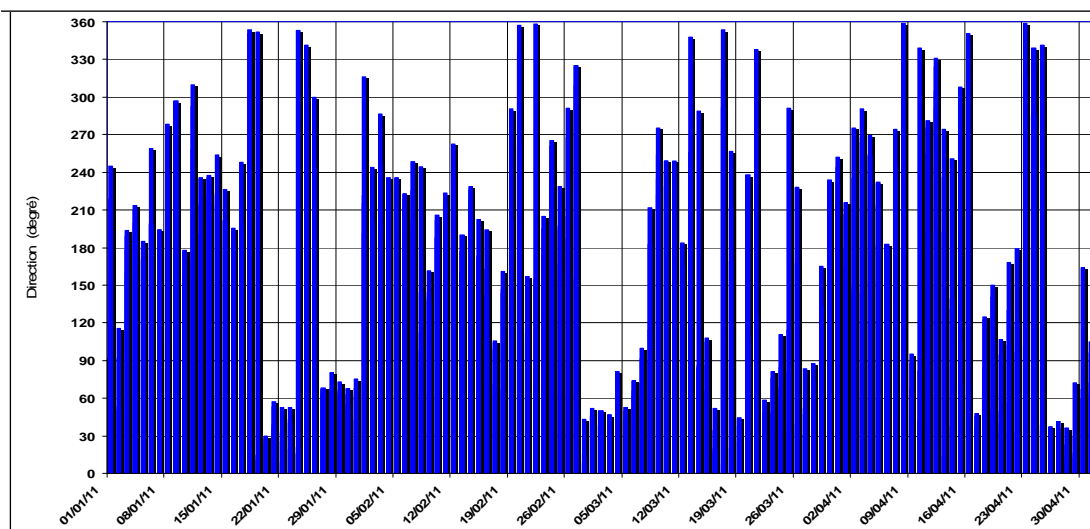
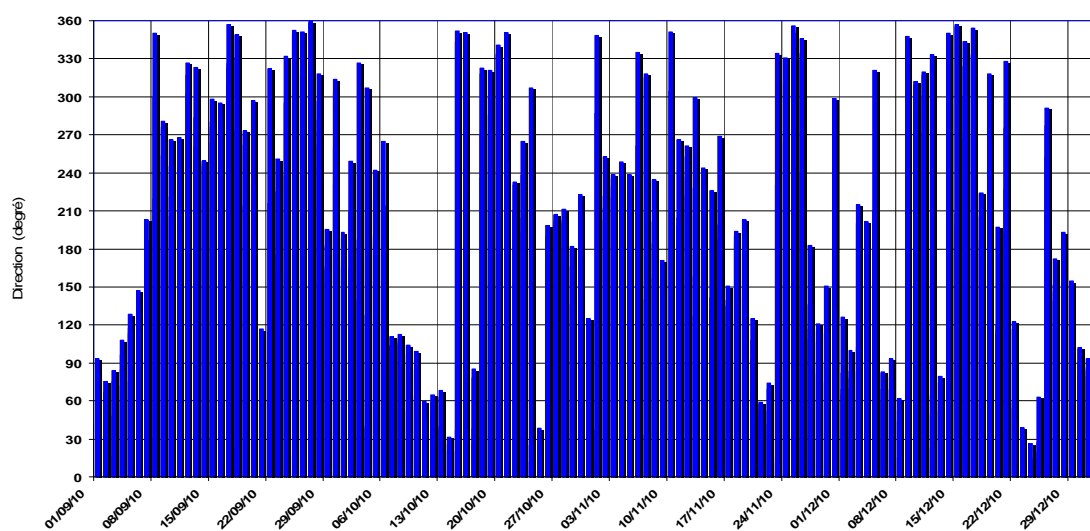


Direction des vents

# ANNEXE 4 : Vitesse et direction des vents - Période Septembre 2010 – Avril 2011

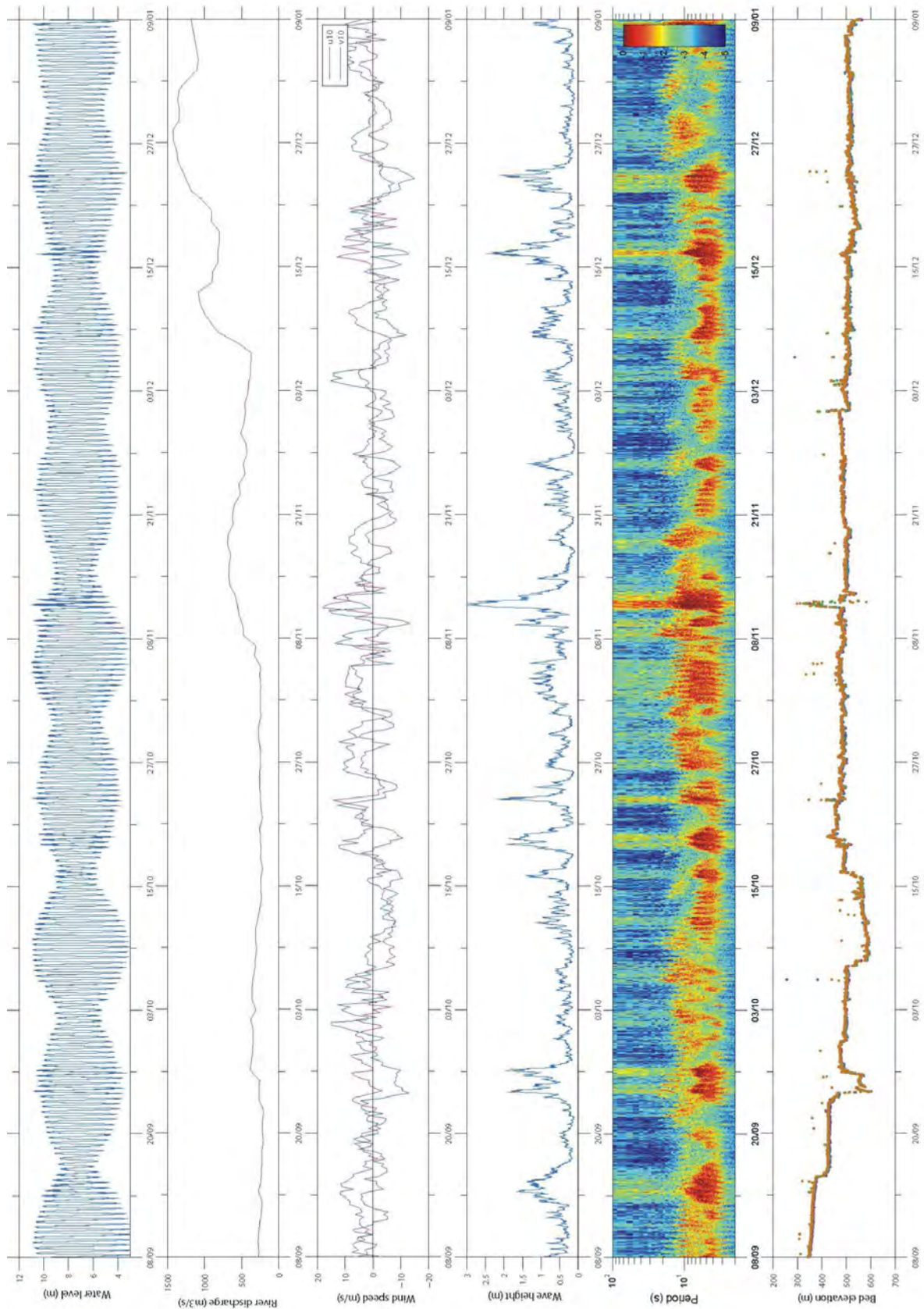


Vitesse des vents

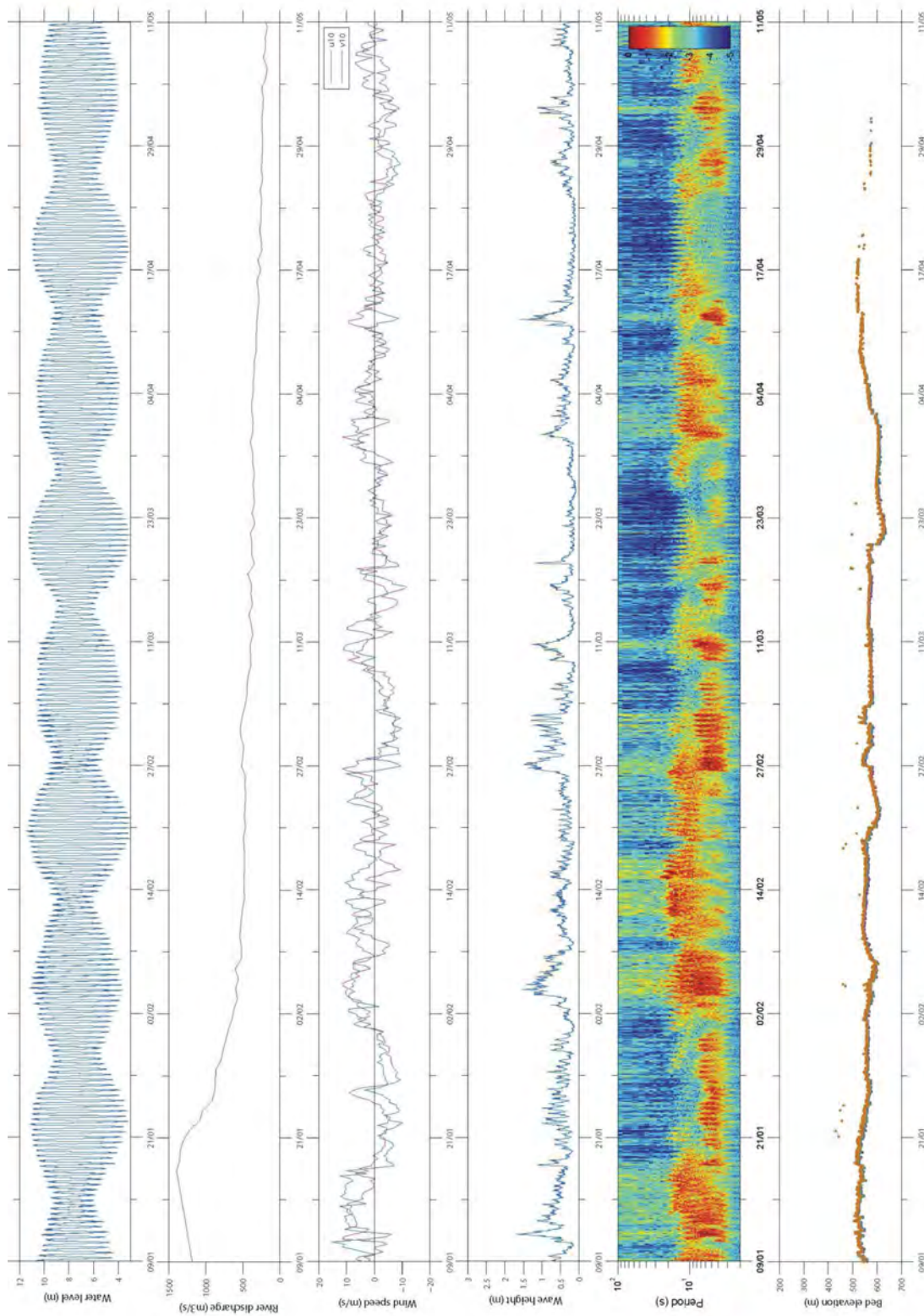


Direction des vents

**ANNEXE 5 a : Enregistrement ALTUS aux « Ratelets » - Période du 08 Septembre 2010 au 09 Janvier 2011) - Les valeurs altimétriques (*graphe inférieur*) sont données en mm**

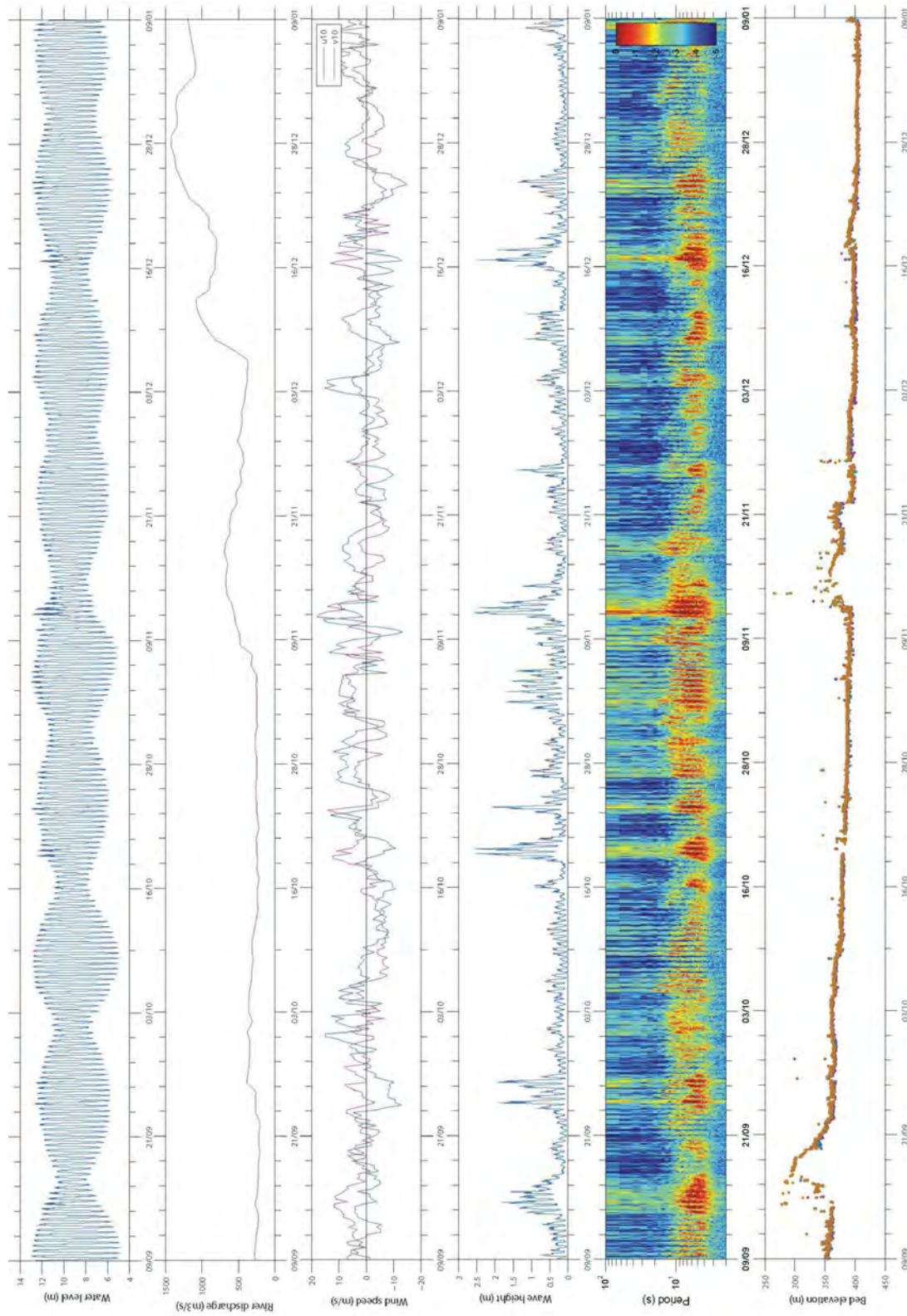


**ANNEXE 5 b : Enregistrement ALTUS aux « Ratelets » - Période du 09 Janvier au 11 Mai 2011)**

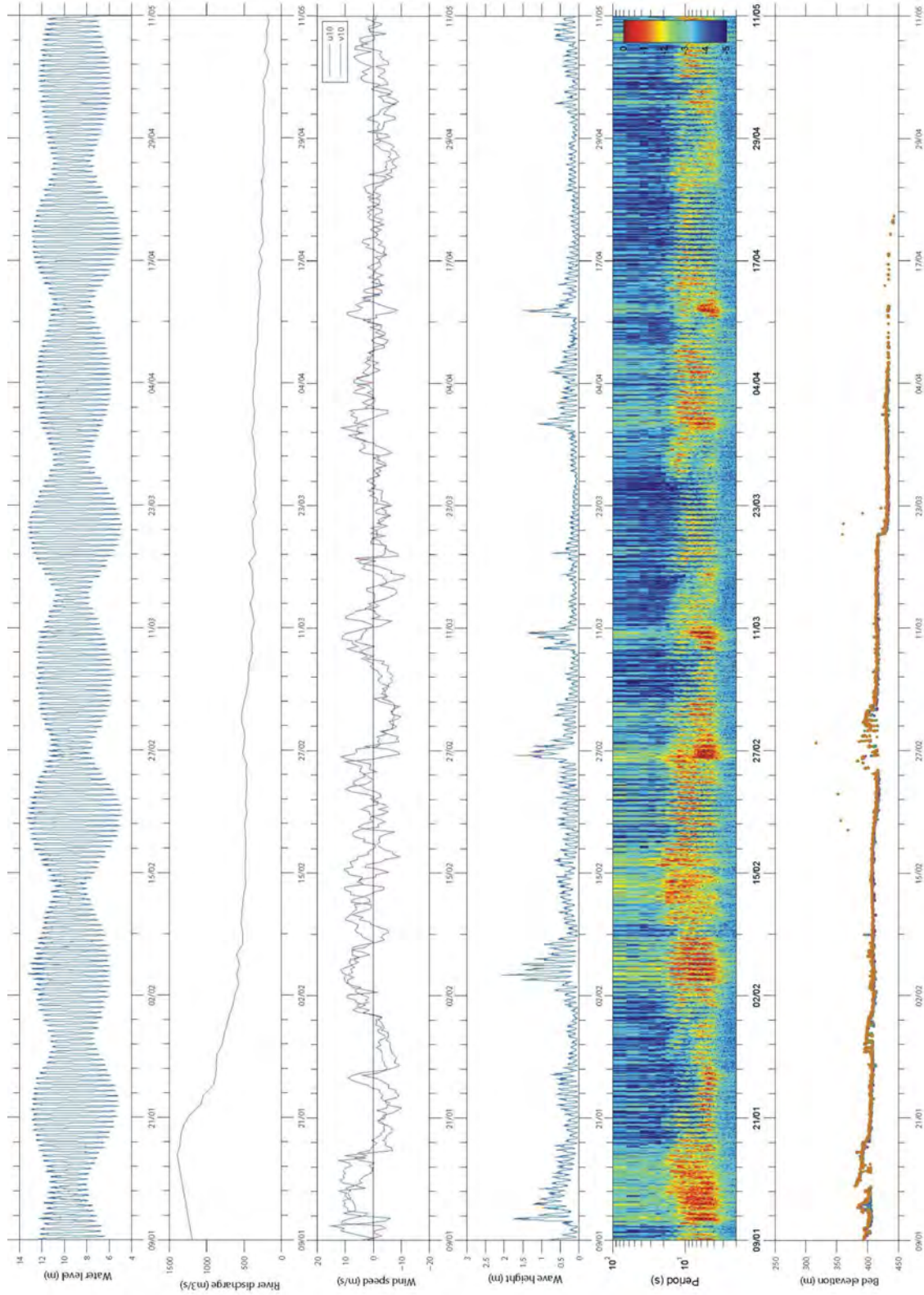




**ANNEXE 6 a : Enregistrement ALTUS au « Ratier » - Période du 09 Septembre 2010 au 09 Janvier 2011) - Les valeurs altimétriques (*graphe inférieur*) sont données en mm**



**ANNEXE 6 b : Enregistrement ALTUS au « Ratier » - Période du 09 Janvier au 11 Mai 2011)** - Les valeurs altimétriques (*graphe inférieur*) sont données en mm





### Références citées dans le rapport

- Alizier S., 2011. Echelles spatio-temporelles d'observations des relation macrobenthos-sédiments : organisation et changements à long terme (1988-2009) des communautés benthiques subtidales de la partie Orientale de la Baie de Seine. Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 206 p + annexes
- Avoine, J., 1981. L'estuaire de la seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle de l'Université de Caen, 236 pp.
- Avoine J., Allen G.P., Nichols M., Salomon J.C., Larssonneur C., 1981. Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France : effect of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology. *Marine Geology*, 40, 119-137.
- Avoine, J., 1994. Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la seine. Rapport d'étude Ifremer Brest - Port Autonome du Havre, 153 pp.
- Barnay A.S., 2003. Structure des peuplements de sables fins plus ou moins envasés en Manche : échelles spatiales et biodiversité. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 143 pp + annexes.
- Brind'Amour, A., 2006. Stratégie d'échantillonnage et protocole d'analyse statistique pour l'évaluation des conséquences des activités d'exploration pétrolière sur les communautés de faune macrobenthique de la marge Angolaise en domaine profond. Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, Plouzané, p. 51.
- Brind'Amour, A., Boisclair, D., Dray, S., Legendre, P., 2011. Relationships between species feeding traits and environmental conditions in fish communities: a three-matrix approach. *Ecological Applications* 21, 363–377.
- Brind'Amour, A., Boisclair, D., Legendre, P., Borcard, D., 2005. Multiscale spatial distribution of a littoral fish community in relation to environmental variables. *Limnology and Oceanography* 50, 465-479.
- 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 Doctorat de l'université de Caen, 249 pp.
- Darnaude AM, Harmelin-Vivien ML, Salen-Picard C., 2001. Food partitionning among flatfish (Pisces : Pleuronectiformes) juveniles in a Mediterranean coastal shallow sandy area. *J Mar Biol Ass UK* 81:119-127.
- Dauvin J.C., 2010. Le Benthos de l'estuaire de la Seine. Fascicule n° 2.4 Seine-Aval, 70 pp.
- Dauvin, J.C., Vasset., N., 2011. Guide méthodologique d'étude à long terme du macrobenthos de l'estuaire de la Seine. Recommandations et préconisations pour une application standardisée des protocoles. Rapport GIP Seine-Aval, 72 pp.
- De Groot S.J., 1969. Digestive system and sensorial factors in relation to the feeding behaviour of flatfish (Pleuronectiformes). *J Cons Int Explor Mer* 32:385-394.
- Deloffre J., Lafite R., Lesueur P., Lesourd S., Verney R., Guézennec L. (2005) Sedimentary processes on a fluvial estuarine mudflat. The macrotidal Seine example (France). *Estuarine and Coastal Shelf Science* 64 : 710-720.

- Delsinne N., 2005. Evolution pluri-millénaire à pluri-annuelle du prisme sédimentaire d'embouchure de la Seine. Facteurs de contrôle naturels et d'origine anthropique. Thèse de Doctorat, Université de Caen, 179 pp.
- Dray, S., 2002. Matching data sets from two different spatial samples. *Journal of Vegetation Science* 13, 867-874.
- Dray, S., Legendre, P., 2008. Testing the link between species traits and environmental characteristics: the fourth-corner problem revisited. *Ecology* 89, 3400-3412.
- Dufrène, M., Legendre, P., 1997. Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* 67, 345-366.
- Folk R.L., 1954. The distinction between grain size and mineral composition sedimentary rock nomenclature. *Journal of Geology* 62, 344-359.
- Garnaud S., Lesueur P., Clet M., Lesourd S., Garlan T., Lafite R., Brun-Cottan J.C., 2003. Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner-shelf setting (eastern Bay of the Seine, France). *Marine Geology* 20, 33-54.
- Gentil, F., Irlinger, J.P., Elkaim, B., Proniewski, F., 1986. Première données sur la dynamique du peuplement benthique des sables fins envasés à *Abra alba* de la baie de Seine orientale. *Actes de Colloques Ifremer* 4, 409-420
- Ghertsos K., 2002. Structure spatio-temporelle des peuplements macrobenthiques de la baie de Seine à plusieurs échelles d'observation. Thèse Université des Sciences et Technologies de Lille, 182 pp.
- GIP Seine Aval 2011 (Fisson C.), Contextes climatique, morphologique & hydro-sédimentaire : Couverture sédimentaire à l'embouchure de la Seine . Fiche thématique Seine Aval, 6 pages.
- 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 Université de Rouen, Agence de l'Eau Seine-Normandie éd., 240 pp.
- Hayes, D.B., Ferreri, C.P., Taylor, W.W., 1996. Linking fish habitat to their population dynamics. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53, 383-390.
- Janson, A.L., 2007. Evolution de la biodiversité benthique des vasières subtidales de l'estuaire de la seine en réponse à la dynamique sédimentaire. De l'approche descriptive à l'approche fonctionnelle. Thèse de Doctorat de l'Université de Rouen, 345 pp.
- Kopp D., Le Bris H., Grimaud L., Nérot, C. and Brind'Amour A. (submitted to CJFAS). Spatial analysis of the trophic interactions between benthic-demersal fish species and their potential preys along a coastal-estuarine gradient using stable isotopes and gut contents.
- Kostecki, C., F. Le Loc'h, J.-M. Roussel, N. Desroy, D. Huteau, P. Riera, H. Le Bris, O. Le Pape. 2010. Dynamics of an estuarine nursery ground: the spatio-temporal relationship between the river flow and the food web of the juvenile common sole (*Solea solea*, L.) as revealed by stable isotopes analysis. *Journal of Sea Research* 64 : 54-60.
- Larsonneur C., 1971. Manche centrale et Baie de Seine : géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse d'Etat, Université de Caen, 394 pp.
- Le Pape O., Modéran J., Beaunée G., Riera P., Desroy N., Savoye N., Harmelin-Vivien M., Darnaude A., Brind'Amour A., Le Bris H., Cabral H., Vinagre C., França S., Kostecki C. (accepté). Organic

matter sources for flatfish juveniles in coastal and estuarine nursery grounds: a meta-analysis for the common sole (*Solea solea*) in contrasted systems of Western Europe. *Journal of Sea Research*

Legendre, P., Galzin, R., Harmelin-Vivien, M.L., 1997. Relating behavior to habitat: Solutions to the fourth-corner problem. *Ecology* 78, 547-562.

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*, Université de Caen, 280 pp.

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, pp. 940-949.

Lesueur P., Lesourd S. et coll., 1999. Sables, chenaux, vasières...: dynamique des sédiments et évolution morphologique. Ifremer eds., 39 pp. ISBN 2-84433-024-x.

Lesourd S., Lesueur P., Brun-Cottan J.C., Garnaud S., Poupinet N., 2003. Seasonal variations of the superficial sediments in a macrotidal estuary : the Seine inlet, France. *Estuarine Coastal and Shelf Sciences*, 58, 3-16.

Lesueur P., Lesourd S., Brun-Cottan J.C., Garnaud S., Poupinet N., 2003. Holocene filling and modern sediment of the Seine estuary (France). *Journal of Quaternary Sciences* 18, 339-349.

Olivier, F., 1997. Régulation des populations de recrues en régime mégatidal : effet du couplage physique-biologique en couche limite benthique. Université de Rennes 1, Rennes, 135 pp.

Thiébaud E., 1994. Dynamique du recrutement et dispersion larvaire de deux annélides polychètes, *Owenia fusiformis* et *Pectinaria koreni*, en régime mégatidal (Baie de Seine orientale, Manche). Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 152 pp.

Thiébaud E., Cabioch L., Dauvin J.C., Retière C., Gentil F., 1997. Spatio-temporal persistence of the *Abra alba* – *Pectinaria Koreni* muddy-fine sand community of the eastern bay of Seine. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 77, 1165-1185.

Tous Rius, A. 2009. La répartition des ressources alimentaires entre les juvéniles de poissons plats (Pleuronectiformes) de l'estuaire de Seine : Etude par analyse des contenus stomacaux. Stage de Master 2, Université de Lille 1.

**Liste des publications publiées et communications présentées par  
l'ensemble des équipes du projet  
(liste revue en septembre 2012 : en rouge les documents issus  
spécifiquement de COLMATAGE 2007-2012)**

**Publications dans des revues internationales**

Bassoullet P., Le Hir P., 2007. In situ measurements of surficial mud strength: A new vane tester suitable for soft intertidal muds. *Continental Shelf Research*, 27, 1200-1205.

Bassoullet P., Verney R., Kervella Y., Kervella S., Jestin H., Voineson G., 2010. Utilisation d'un altimètre (ALTUS) destiné à la quantification des dépôt/érosion en domaine littoral pour l'étude des corrélations avec les caractéristiques de vagues et les interfaces de dépôt. *La Houille Blanche - Revue Internationale de l'Eau*, 5, 81-86.

Blanchet H., Lavesque N., Ruellet T., Dauvin J.C., Sauriau P.-G., Desroy N., Desclaux C., Leconte M., Bachelet G., Janson A.L., Bessineton C., Duhamel S., Jourde J., Mayot S., Simon S., De Montaudouin X., 2008. Use of Biotic Indices in semi-enclosed coastal ecosystems and transitional waters habitats - Implications for the implementation of the European Water Framework Directive. *Ecological Indicators*, 8, 360-372.

Dauvin, J.C. & Ruellet, T., 2007. Polychaete/amphipod ratio revisited. *Mar. Pollut. Bull.*, 55: 215-224.

Dauvin, J.C., Ruellet, T., Thiebaut, E., Gentil, F., Desroy, N., Janson, A.L., Duhamel, S., Jourde, J., Simon, S. 2007. The Presence of *Melinna palmata* (Annelid Polychaete) and *Ensis directus* (Mollusc Bivalve) as indicators of environmental changes in the Bay of Seine. *Cah. Biol. Mar.* 48, 391-401.

Dauvin, J.C., 2007. Paradox of estuarine quality: benthic indicators and indices in estuarine environments, consensus or debate for the future. *Mar. Pollut. Bull.*, 55: 271-281.

Dauvin, J.C., Ruellet, T., Desroy, N. & Janson, A.L., 2007. The ecological quality status of the Bay of Seine and the Seine estuary: use of biotic indices. *Mar. Pollut. Bull.*, 55: 241-257.

Dauvin, J.C., Ruellet, T., Thiébaut, E., Gentil, F., Desroy, N., Janson, A.L., Duhamel, S., Jourde, J., Simon, S. 2007. The Presence of *Melinna palmata* (Annelid Polychaete) and *Ensis directus* (Mollusc Bivalve) as indicators of environmental changes in the Bay of Seine. *Cah. Biol. Mar.* 48, 391-401.

Dauvin, J.C., 2008. Effects of heavy metal contamination on the macrobenthic fauna in estuaries: the case of the Seine estuary. *Marine Pollution Bulletin.*, 57, 160-169.

Dauvin, J.C., Fisson, C., Garnier, J., Lafite, R., Ruellet, T., Billen, G., Deloffre, J., Verney, R., 2008. A report card and indicators of quality in the Seine Estuary: from a scientific approach to an operational tool. *Marine Pollution Bulletin* 57, 187-201.

Dauvin J.C., Bachelet G, Barillé A.L., Blanchet H., De Montaudouin X., Lavesque N., Ruellet T., 2009. Development of benthic indicators and index approaches in the three main estuaries

along the French Atlantic coast (Seine, Loire and Gironde) for the implementation of the European Water Framework Directive (WFD). *Marine Ecology, an evolutionary perspective*: 30: 228-240.

Dauvin, J.C., Ruellet, T., 2009. The Estuarine Quality Paradox: is it possible to define an Ecological Quality Status for specific modified and naturally stressed estuarine ecosystems? *Marine Pollution Bulletin* 59: 38-47.

Dauvin, J.C., Alizier, S., Vallet, C., Ruellet, T. 2010. Does the Port 2000 harbour construction have an effect on the Seine estuary suprabenthic community (English Channel)? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86, 42-50.

Dauvin, J.C. S. Alizier, C. Rolet, A. Bakalem, G. Bellan, J.L. Gomez Gesteira, S. Grimes, J.A. De-La-Ossa-Carretero, Y. Del-Pilar-Ruso., 2012. Response of the Different Indices to the Diverse Human Pressures. *Ecological Indicators* 12, 143-143.

De-La-Ossa-Carretero, J.A. & Dauvin, J.C., 2010. A Comparison of Two Biotic Indices, AMBI and BOPA, for Assessing the Ecological Quality Status (EcoQS) of Benthic Communities. *Water Transitional Bulletin* 4, 12-24.

Desroy, N., Janson, A.L., Denis, L., Charrier, G., Lesourd, S., Dauvin, J.C., 2007. The Intra-annual variability of soft bottom macrobenthos abundance patterns in the North Channel of the Seine Estuary. *Hydrobiologia* 588: 173-188.

Ducrotoy, J.P., Dauvin, J.C., 2008. Spatio-temporal scales in estuarine conservation and restoration *Marine Pollution Bulletin* 57, 208-218.

Jacobs W., Le Hir P., van Kesteren W. Cann P., 2011. Erosion threshold of sand-mud mixtures. *Continental Shelf Research* 31, S14-S25

Jourde, J., Alizier, S., Dancié, C., Dauvin J.C., Desroy, N., Dubut S., Gentil, F., Grall, J., Hanin C., Lanshere J., Thiebaut E. (sous presse) First and repeated records of the tropical-temperate crab *Asthenognathus atlanticus* Monod, 1932 (Decapoda : Brachyura) in the eastern part of the Bay of Seine (eastern English Channel, France). *Cahiers de Biologie Marine*.

Le Hir P., Monbet Y., Orvain F., 2007. Sediment erodability in sediment transport modelling: can we account for biota effects ? *Continental Shelf Research*, 27, 1116-1142.

Le Hir P., 2007. Physique du sédiment et des eaux interstitielles : stratégies de modélisation pour les besoins en environnement côtier. *La Houille Blanche*, N°04-2007, 28-34.

Le Hir P., Cann P., Waeles B., Jestin H., Bassoullet P., 2008. Erodability of natural sediments: experiments on sand/mud mixtures from laboratory and field erosion tests. *In* Sediment and Ecohydraulics: INTERCOH 2005, Kusuda, Yamanishi, Spearman and Gailani (Eds), Elsevier, Proc. in Marine Science N°9, 137-153.

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

Lozach, S., Dauvin, J.C., Méar, Y., Murat, A., Dominique Davoult, D., Migné, A., 2011. Sampling Epifauna, a Necessity for a Better Assessment of Benthic Ecosystem Functioning: An Example of the Epibenthic Aggregated Species *Ophiothrix fragilis* from the Bay of Seine. *Marine Pollution Bulletin* 62, 2753-2760.

Orvain F., Le Hir P., Sauriau P.-G., Lefebvre S., in press. Modelling the effects of macrofauna on sediment transport and bed elevation: application over a cross-shore mudflat profile and model validation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.

Ruellet, T., Dauvin, J.C., 2007. Benthic Indicators: Analysis of the Threshold Values of Ecological Quality Classifications for Transitional Waters. *Marine Pollution Bulletin* 54: 1707-1714.

Ruellet, T., Dauvin, J.C., 2008. Invertébrés aquatiques de la partie orientale de la baie et de l'estuaire de Seine: deux siècles d'observations. *C. R. Biologies* 331 : 481-488.

Thouvenin B., Gonzalez J.L., Chiffolleau J.F., Boutier B., Le Hir P., 2007. Modelling Pb and Cd dynamics in the Seine estuary. *Hydrobiologia* (2007) 588:109-124.

Waeles B., Le Hir P., Lesueur P., Delsinne N., 2007. Modelling sand/mud transport and morphodynamics in the Seine river mouth (France): an attempt using a process-based approach. *Hydrobiologia* (2007) 588:69-82.

Waeles B., Le Hir P., Lesueur P., 2008. A 3D morphodynamic process-based modelling of a mixed sand/mud coastal environment: the Seine estuary, France. *In* Sediment and Ecohydraulics: INTERCOH 2005, Kusuda, Yamanishi, Spearman and Gailani (Eds), Elsevier, Proc. in Marine Science N°9, 477-498.

### **Publication soumise**

Brind'Amour A., Laffargue P., Morin J., Cochard M.L., Vaz S., Foveau, A., Le Bris H. Taxonomic sufficiency of epibenthic macro and mega-fauna in scientific bottom trawl surveys. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*

### **Publications en preparation**

Durieux, E., Morin, J., Alizier, S., Dauvin, J.C., Brind'Amour, A. Temporal changes in the spatial coupling between benthic-demersal fishes and their macrobenthic preys in the Seine estuary.

Dauvin J.C., Méar, Y., Murat, A., Poizot, E., Lozach, S. Beryouni K. Spatio-temporal patterns of the brittle-star *Ophiothrix fragilis* in the eastern Bay of Seine. *Estuarine Coastal and Shelf Science*.

### **Autres publications**

Dauvin J.C., Alizier S., Rolet C., Bakalem A., Bellan G., Gomez Gesteira J.L., Grimes S., de-la-Ossa-Carretero J., Del-Pilar-Ruso Y., 2010. Benthic Indicators for assessment the quality status of coastal soft-bottom communities: response of different indices to diverse human

pressures in the North-eastern Atlantic Ocean and Mediterranean Sea. ICES CM 2010/H:1435, 42 p.

Denis L., Boust D., Thouvenin B., Le Hir P., Deloffre J., Gonzales J.L., Gillet P., 2009. Dynamic diagenetic modelling and impacts of biota. In Environmental assessment of estuarine ecosystems, a case study (C. Amiard-Triquet & P. S. Rainbow, Eds), CRC Press, 303-322

Durieux E., Morin, J., Alizier S., Dauvin J.C., Brind'Amour A., 2010. Temporal changes in the spatial coupling between benthic-demersal fishes and their macrobenthic preys in the Seine estuary. ICES ASC 2010/G:17, 21 p.

Le Hir P., 2009. Simulation des flux particuliers à l'embouchure de l'estuaire de la Seine : exercice d'estimation des incertitudes. Comptes-rendus 31<sup>è</sup> journées de l'Hydraulique « Hydrodynamique et gestion des sédiments dans les estuaires, les baies et les deltas », SHF, 9p

### **Documents connexes**

Dauvin, J.C., 2010 (Coordinateur). Alizier, S., Aulert, C., Bessineton, C., Cuvilliez, A., Denis, L., Dauvin, J.C., Garcia, C., Janson, A.L., Jourde, J., Lesourd, S., Lozach, S., Morin, J., Ruellet, T., Spilmont, N., Tous Rius, A. Le benthos de l'estuaire de la Seine. Fascicule Seine-Aval, Rouen, France, 2.4., 70 pp.

Dauvin, J.C., Vasset, N., 2011. Guide méthodologique d'étude à long terme du macrobenthos de l'estuaire de Seine. Recommandations et préconisations pour une application standardisée des protocoles. Rapport pour le GIP Seine-Aval, 72 pp.

### **Mémoires de thèses, de master et autres**

Alizier S., 2011. Les communautés benthiques subtidales de la partie orientale de la baie de Seine. Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 206 p + annexes

Anquez, T., 2011. Répartition spatiale et variabilité interannuelle des classes d'âge et de l'abondance chez quatre espèces benthiques subtidales abondantes en baie de Seine orientale. Mémoire de Master 1, Université de Lille1, Biodiversité et Ecosystèmes, Rapport de stage 35 p.

Baffreau A., 2011. Distribution des polychètes dans la partie orientale de la baie de Seine en condition hivernale. Mémoire de Master 1, Université d'Aix-MarseilleII, Biologie et Ecologie marines, Rapport de stage 37 p.

Bayona, Y., 2009. Les Foraminifères de l'estuaire de la Seine. Ecologie, peuplements et taxonomie. Université d'Angers, Master 2 Altération des Systèmes Biologiques, 35 p.

Beryoun, K., 2012. Variabilité des données environnementales. Exemple des sédiments marins. Thèse de Doctorat Université de Perpignan Via Domitia, 396 p.



Boinet M., 2010. Etude de l'hétérogénéité spatio-temporelle de la communauté benthique subtidale à *Abra alba-Pectinaria koreni* de la partie orientale de la baie de Seine et réflexions sur son observation à long terme. Mémoire de Master 1, Université de Lille1, Biodiversité et Ecosystèmes, Rapport de stage 33 p.

Dubé B. 2011. Caractérisation spatiale des habitats potentiels et réalisés de trois espèces de poissons plats via le couplage de marqueurs naturels (signature isotopique, microchimie des otolithes et contenus stomacaux). Mémoire de stage de Master 2, ingénierie mathématique, spécialité probabilités et statistiques. Département Ecologie et Modèles pour l'Halieutique, Centre IFREMER de Nantes.

Durieux E., 2010. Organisation spatiale et fonctionnelle de la mosaïque d'habitats pour les poissons benthodémersaux de l'estuaire de Seine. Rapport Post-Doc. Département Ecologie et Modèles pour l'Halieutique, Centre IFREMER de Nantes. 15 pp.

Feltrini, F., 2011. Variabilité spatio-temporelle des populations hivernales de Mollusques et d'Echinodermes dans le peuplement des sables fins envasés à *Abra alba* de la baie de Seine orientale. Mémoire de Master 1, Université Paris VI, Océanographie et Environnements marins, Rapport de stage 6 p.

Habi, S., 2009. Structures en taille de quelques espèces d'invertébrés macrobenthiques de l'estuaire et de la partie orientale de la baie de Seine en automne 2008. Mémoire de stage de master 1, Biodiversité Ecosystèmes Continentaux et Marin, Université de Lille1, 25 p.

Haller, C., 2011. *Foraminifera as Bio-Indicators of Anthropogenic Impact in the Bay of Seine, France*. Masterarbeit in Mikropaläontologie, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 138 p.

Khouatria, D., 2011. Distribution des crustacés dans la partie orientale de la baie de seine en condition hivernale. Mémoire de Master 1, Université de Caen Basse-Normandie, Ecosystèmes Biodiversité et Anthropisation, Rapport de stage 25 p.

Lozach, S., 2007. Etude expérimentale du rôle de l'ophiure *Ophiothrix fragilis* (Abildgaard, 1789) dans les dépôts de particules fines en baie de Seine. Mémoire de Master2 Recherche, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 40 p.

Lozach, S., 2008. Communautés benthiques en Manche : typologie des habitats et variations biogéographiques de la communauté de graviers dans son bassin oriental ». Diplôme Supérieur de Recherche, Université des Sciences et technologies de Lille, 80 p.

Lozach S., 2011. Typologie, structure et fonctionnement des habitats marins dans le bassin oriental de la Manche. Thèse de Doctorat à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 200 p. (travail pro-partie dans COLMATAGE).

Lule, J., 2010. Etude de la variation temporelle des communautés de foraminifères en baie de Seine, dans le cadre de la création d'un indice biotique. Mémoire de Master 1, Université Catholique de l'Ouest, Angers, Rapport de stage 37 p.

Marmin S., 2010. Les clapages de sédiments en mer : protocole d'étude d'un site en baie de Seine à partir d'une approche bio-sédimentaire intégrée étudiante. Diplôme Supérieur de Recherche, Université de Lille 1 (travail pro-partie dans COLMATAGE).

Tous Rius, A., 2009. La répartition des ressources alimentaires entre les juvéniles de poissons plats (Pleuronectiformes) de l'estuaire de Seine : étude par analyse des contenus stomacaux. Mémoire de Master 2 Recherche, Biodiversité Ecosystèmes Continentaux et Marin, Université de Lille1, 35 p. + annexes

### **Communications orales ou posters**

Alizier, S., Dauvin, J.C., Desroy, N., Gentil, F., Lesourd, S., Lesueur, P., Thiébaud, E., 2011. Spatio-temporal persistence (1986-2011) of an *Abra alba* - *Pectinaria koreni* muddy fine sand community in a high perturbed environment : the case of the eastern part of the bay of Seine (English Channel), World Conference on Marine Biodiversity. Our Oceans, Our future, Aberdeen, Scotland, U.K., 16-30 September 2011, abstract p. 59.

Bassoullet P., Le Hir P., Jestin H., Verney., 2009. Mesures de vagues et d'érosions/dépôts dans l'embouchure de la Seine : 9 mois de mesures en continu avec les systèmes ALTUS. Séminaire annuel Seine-Aval du Projet COLMATAGE : Couplages bio-morpho-sédimentaires et dynamique à long terme des habitats et peuplements benthiques et ichtyologiques en Seine-aval, 8-10 septembre 2009, Rouen, France, Poster.

Cann P., Silva Jacinto R., Le Hir P., Bassoullet P., 2010. Rheological and sedimentological characterization of cohesive sediments erodability. 18<sup>th</sup> International Sedimentological Congress, Mendoza, Sept.26<sup>th</sup> -Oct1<sup>st</sup> 2010, Argentina.

Brind'Amour A., Rochet, M.J., Morin J. 2012. Functional diversity on nursery habitats of the bay of Biscay and the Eastern English Channel (bay of Seine). XIII International symposium on oceanography on the bay of Biscay. Santander, 11-13 April 2012.

Brind'Amour A., Duhamel S, Morin J., De Roton G. 2009. Comparaison des protocoles d'échantillonnage des peuplements ichtyologiques. Séminaire Seine-Aval. Rouen 8-9-10 septembre 2009.

Brind'Amour A., Morin J. 2008. Population and community indicators used in coastal nursery habitats. 7<sup>th</sup> International Flatfish Symposium . Sesimbra Portugal. 2-7 November 2008

Brind'Amour, A., Laffargue, P., Morin, J., Vaz, S., Le Bris, H. 2011. Taxonomic sufficiency of epibenthic species in scientific trawling surveys. Colloque international sur la vulnérabilité des écosystèmes côtiers au changement global et aux événements extrêmes. 18 – 21 octobre 2011, Biarritz (France).

Dauvin, J.C., Galichon, P., Sirost, O., Romana, A., 2007. Integrative tools and methods in assessing Ecological Integrity in Estuarine and Coastal systems. Conférence EcoSummit 2007, Pékin, 22-27 May 2007, Chine, résumé p. 133.

Dauvin, J.C., 2007. Les fonctions écologiques de l'estuaire de la Seine. Séminaire Seine-Aval 'Restauration environnementale et reconquête de l'estuaire de la Seine. 4-5 juin 2007, le Havre France, résumé 1 p.

Dauvin, J.C., 2007. De Seine-Aval 3 à Seine-Aval 4. Séminaire Seine Aval, Rouen, 5-6 septembre 2007, résumé p. 6.

Dauvin, J.C., 2007. Projet COLMATAGE Couplages bio-morpho-sédimentaires et dynamique à long terme des habitats et peuplements benthiques et ichtyologiques en Seine aval. Séminaire Seine Aval, Rouen, 5-6 septembre 2007, résumé p. 11.

Dauvin, J.C., 2007. The Estuarine Quality Paradox: is it possible to define Ecological Quality Status of specific modified and naturally stressed estuarine ecosystems Estuarine Research Federation Conference. Novembrer 4-8, 2007, Providence, Rhode Island, USA, résumé 1 p.

Dauvin, J.C., Ruellet, T., 2008. Benthic indicators, from BOPA to BO2A. Workshop on benthos related environmental metrics , 11-14 February 2008, Ostende, Belgium, abstract 1 p.

Dauvin, J.C., 2008. Bilan Scientifique de Seine-Aval 3. Séminaire annuel Seine-Aval, 3-4 septembre 2008, Rouen, France, résumé, 1 p.

Dauvin, J.C., 2008. COLMATAGE : Couplages bio-morpho-sédimentaires et dynamique à long terme des habitats et peuplements benthiques et ichtyologiques en Seine Aval Séminaire annuel Seine-Aval, 3-4 septembre 2008, Rouen, France, résumé 1 page.

Dauvin, J.C., 2009. COLMATAGE : Couplages bio-morpho-sédimentaires et dynamique à long terme des habitats et peuplements benthiques et ichtyologiques en Seine Aval Séminaire annuel Seine-Aval, 8-10 septembre 2009, Rouen, France, Recueil des résumés, 1 p.

Dauvin, J.C., 2009. Vers une stratégie d'observation à long terme de l'Estuaire de la Seine. Séminaire GIP Seine-Aval, Stratégie d'observation à long terme en milieu estuarien. Cas de l'estuaire Seine-Aval. Rouen les 21 et 22 Octobre 2009, résumé 1 page.

Dauvin, J.C., Bachelet, G., Barillé, A., Blanchet, H., De Montaudouin, X., Lavesque, N., Ruellet T., 2008. Development of benthic indicators and indices approaches in the three main estuaries along the French Atlantic coasts (Seine, Loire and Gironde) within the European Water Framework Directive. International workshop 'The implementation of the Water Framework Directive (CE2000/60) in Italy : state of the art on benthic indicators and European experiences. Présentation de la conférence invitée ' (WFD), 29<sup>th</sup> April 2008, Ferrara, Italy, abstract p. 3.

Dauvin, J.C., 2010. Colloque Estuaires, fleuves et cours d'eau. Représentations et pratiques. Comprendre l'estuaire de la Seine pour mieux le gérer. Présentation de la communication orale invitée. Vers une vision partagée de l'estuaire de Seine place du patrimoine naturel dans le fonctionnement et la perception du territoire estuarien. Rouen, France, 5-6 mai 2010.

Dauvin, J.C., 2010. International Workshop. Climatic Change Impacts on Estuarine and Costal Ecosystems: a zooplankton perspective. Présentation de la communication orale. Long-term changes of subtidal communities from the Seine Estuary. Boulogne sur mer, France, 28-30 June 2010.

Dauvin, J.C., 2010. 2010 ICES Annual Science Conference. Présentation de la communication orale : Benthic Indicators for assessment the quality status of coastal soft-

bottom communities: response of different indices to diverse human pressures in the North-eastern Atlantic and Mediterranean Sea. Nantes 20-24 September 2010.

Durieux E., Morin J., Alizier S., Dauvin J.C., Brind'Amour, A. 2010. Temporal changes in the spatial coupling between benthic-demersal fishes and their macrobenthic preys in the Seine estuary. Présentation. ICES ASC 2010/G. 20-24 septembre 2010.

Le Hir P., Bassoullet P., Jestin H., Répécaud M., 2009. Nouvelles mesures de turbidité dans l'embouchure de la Seine, en vue de réactualiser la validation du modèle hydrosédimentaire. Séminaire Seine-Aval, Rouen, 8-10 sept.

Le Hir P., 2009. Simulation des flux particuliers à l'embouchure de l'estuaire de la Seine : exercice d'estimation des incertitudes. 31<sup>e</sup> journées de l'Hydraulique « Hydrodynamique et gestion des sédiments dans les estuaires, les baies et les deltas », colloque de la SHF, Paris 22-23 sept

Le Hir P., Kervella Y., Bryère P., Bassoullet P., Jestin H., Gohin F., Lafite R., Thouvenin B., 2010. Modélisation validée de l'hydro-morpho-sédimentologie, base physique d'une modélisation environnementale de l'estuaire de la Seine. Séminaire Seine-Aval, Rouen, 13-14 Sept. 2010.

Le Hir P., A. Sottolichio, V. Foussard, 2011. Computation of HydroMorphoSedimentary indicators of Good Ecological Status in estuaries, from mathematical process-based models. ELET-ECSA conference, Bordeaux, Oct.

Lesourd, S. et équipe COLMATAGE., 2010. Séminaire GIP Seine-Aval. Présentation de la communication orale : un point sur la couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Rouen les 13 et 14 septembre 2010.

Lozach, S., Dauvin, J.C., 2009. Typologie des habitats benthiques dans le bassin oriental de la Manche. Colloque CARHAMB'AR, 3-5 février 2009–Ifremer Brest, résumé p. 32-36.

Lozach, S., Alizier, S., Foveau, A., Garcia, C., Dauvin, J.C., 2011. Coarse sediment habitats diversity in the eastern English Channel. World Conference on Marine Biodiversity. Our Oceans, Our future, Aberdeen, Scotland, U.K., 16-30 September 2011, abstract p. 29.

Marmin S., Dauvin J.C., Denis L., 2010. Étude et caractérisation d'un futur site de clapage en baie de Seine par une approche bio-sédimentaire intégrée. Forum des jeunes Océanographes, Wimereux le 30 septembre et 1 octobre 2010. Poster (travail pro-partie dans COLMATAGE).

Orvain F., Le Hir P., Sauriau P.G., Lefebvre, S., 2007. The effects of benthic organisms on sediment erodability in intertidal systems : what effects are relevant for what objectives (modelling the sediment dynamics or modelling the food web)? 9<sup>th</sup> INTERCOH conf, 25-28 sept, Brest

Ruellet, T., Alizier, S., Dancie, C., Dauvin, J.C., Desroy, N., Jourde, J., Lesourd, S., Lozach S., 2009. Le suivi du macrobenthos à long-terme dans l'estuaire de Seine : un besoin de normalisation Séminaire GIP Seine-Aval, Stratégie d'observation à long terme en milieu estuarien. Cas de l'estuaire Seine-Aval. Rouen les 21 et 22 Octobre 2009, résumé 1 page.

Ruellet, T., Bessineton, C., Cuvillier, A., Dauvin, J.C., Jourde, J., Lafite, R., Morin, J., Simon, S., 2008. : La restauration des fonctionnalités estuariennes : cas de la vasière Nord. Séminaire annuel Seine-Aval, 3-4 septembre 2008, Rouen, France, résumé 1 page.

Ruellet T., Bacq N., Bessineton C., Dauvin, J.C., Duhamel, S., Jourde, J., Simon., S., 2009. Does it is possible to evaluate the effects of creation of estuarine intertidal mudflat through the macrobenthos? Case of the Seine estuary. Aslo Meeting, Nice (France), 21-25 January 2009, abstract 1p.

Tous Rius, A., Brind'amour, A., Dauvin, J.C., Durieux, E. & Morin, J., 2009. La répartition des ressources alimentaires entre les juvéniles de poissons plats (Pleuronectiformes) de l'estuaire de la Seine : étude par analyse des contenus stomacaux. Séminaire annuel Seine-Aval, 8-10 septembre 2009, Rouen, France, Recueil des résumés, 1 p.

Trenkel V., Bertrand J., Brind'Amour A., Cochard M.-L., Coppin F., Jadaud A., Laffargue P., Léauté J.-P., Lorange P., Mahé J.-C., Morin J., Rochet M.-J., Salaun M., Schlaich I., Vérin Y.. 2011. The French scientific surveys: status information and ecological indicators for populations and communities from estuaries down to continental slopes. Colloque international sur la vulnérabilité des écosystèmes côtiers au changement global et aux événements extrêmes. 18 – 21 octobre 2011, Biarritz (France).

Verney R., Voineson G., Jestin H., Bassoullet P., Le Hir P., 2009. Laboratory investigation of sediment bed features with a submersible acoustic echosounder: the ALTUS system. Colloque International INTERCOH'09, Rio de Janeiro, 3-8 May 2009, Brazil.

Crédit photo couverture : GIP Seine-Aval, C. Dégremont  
Pour tout renseignement, veuillez contacter la coordination scientifique : [cdegremont@seine-aval.fr](mailto:cdegremont@seine-aval.fr)

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

Le GIP Seine-Aval est financé par :

