

**THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET**  
**TECHNOLOGIES DE LILLE 1**

Présentée par

**Sandrine ALIZIER**

Pour obtenir le titre de  
**Docteur de l'Université de Lille 1**

Sujet de la thèse :

**ECHELLES SPATIO-TEMPORELLES D'OBSERVATION DES RELATIONS  
MACROBENTHOS – SEDIMENTS : ORGANISATION ET CHANGEMENTS A  
LONG TERME (1988-2009) DES COMMUNAUTES BENTHIQUES SUBTIDALES  
DE LA PARTIE ORIENTALE DE LA BAIE DE SEINE**

Soutenue le 15 décembre 2011, devant le jury composé de :

Guy BACHELET	Directeur de Recherche (CNRS)	(Rapporteur)
Patrick LESUEUR	Professeur (Université Caen Basse Normandie)	(Rapporteur)
Anik BRIND'AMOUR	Cadre de Recherche (IFREMER)	(Examineur)
Franck GENTIL	Maître de Conférences (Université Pierre et Marie Curie)	(Examineur)
Sandric LESOURD	Maître de Conférences (Université du Littoral Côte d'Opale)	(Examineur)
Sami SOUISSI	Professeur (Université Lille1)	(Examineur)
Jean-Claude DAUVIN	Professeur (Université de Caen Basse-Normandie)	(Directeur)



## CADRE DE LA THESE ET PRINCIPAUX OBJECTIFS

Mon travail de thèse, inséré dans le projet COLMATAGE, lui-même *pro parte* du programme Seine Aval, porte essentiellement sur les relations entre la macrofaune benthique et les sédiments des fonds meubles de la baie de Seine Orientale, située en Manche. Afin d'éviter toute confusion et de faciliter la lecture de ce mémoire, la Figure 1 propose les délimitations du secteur étudié ainsi que la toponymie associée à laquelle il sera régulièrement fait référence.

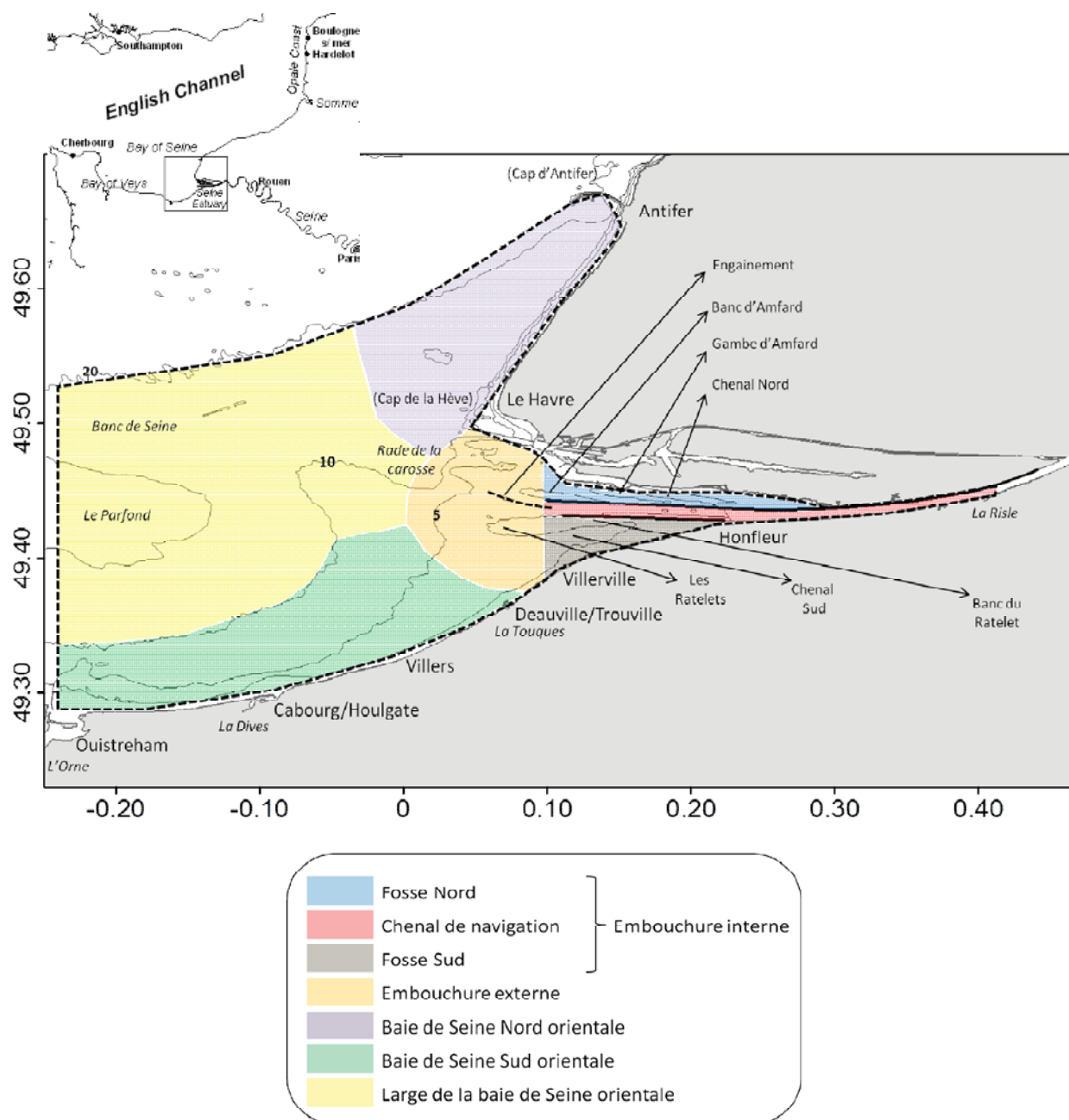


Figure 1 : Délimitations et toponymie associée, utilisée dans le cadre de ce travail de thèse. Le secteur en pointillés représente la baie de Seine Orientale et son estuaire aval jusqu'à la Risle, étudié dans le cadre du projet COLMATAGE. La bathymétrie figurant en fond de carte correspond à celle du SHOM 1997.

## ¶ Le programme Seine Aval et le projet COLMATAGE

Le programme Seine Aval, programme de recherche pluridisciplinaire, a vu le jour en 1995 pour pallier au manque de connaissances scientifiques relatives au fonctionnement de l'estuaire de la Seine (Figure 2).

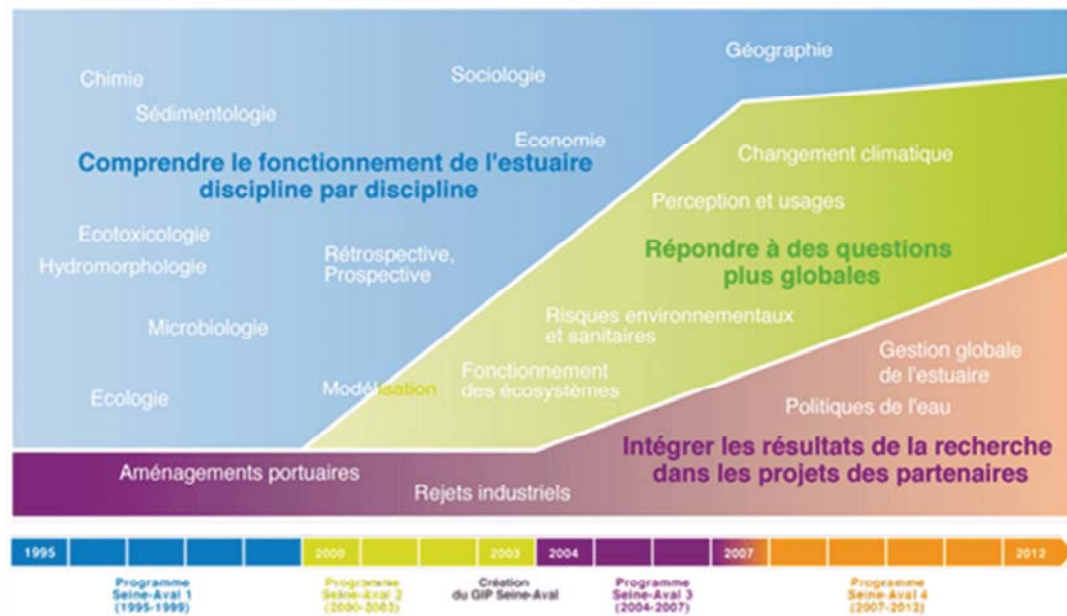


Figure 2 : Organigramme du programme Seine-Aval

La première phase de Seine Aval (1995-1999) portait sur l'établissement d'un état des lieux des connaissances, nécessaire pour comprendre le fonctionnement de l'estuaire de la Seine et pour appréhender les impacts des futurs aménagements et des nombreuses activités anthropiques touchant le secteur (pêche, loisirs, industrie). La seconde phase du projet (2000-2003) s'est tournée vers un cadre plus opérationnel pour privilégier les liens entre les différentes disciplines. La notion de "Gestion Globale de l'Estuaire de la Seine", initiée par le Conseil de l'Estuaire est alors née du constat que la compréhension du fonctionnement de ce système ne pouvait être abordée que dans son ensemble, pour pouvoir répondre à une question fondamentale : "Que voulons-nous aujourd'hui pour l'estuaire dans les deux prochaines décennies?"

La quête de connaissance et de compréhension des phénomènes, dans un tel système caractérisé par une dynamique hydro-sédimentaire et anthropique soutenue, s'est poursuivie dans la phase trois de Seine Aval (2004-2007), au sein de laquelle est venu s'ajouter le besoin de développer des outils de "décisions", introduisant ainsi un caractère plus appliqué à la recherche. A ce stade, le besoin de faire le lien entre les différentes disciplines scientifiques et entre les différents acteurs de l'estuaire (chercheurs, aménageurs, décideurs) a conduit à la création en



2003 du Groupement d'Intérêt public Seine-Aval (GIP Seine-Aval). La mission du GIP s'articule autour de la maîtrise d'ouvrage du programme scientifique, du développement de l'application et de la valorisation des résultats de la recherche, du système d'observation, de l'administration de données et de la communication vers tous les publics. La quatrième phase du programme, qui a débuté en 2007, et qui se poursuivra jusqu'en 2012, comprend trois axes de recherche (figure 3) et 32 projets qui sont financés par le GIP Seine-Aval.

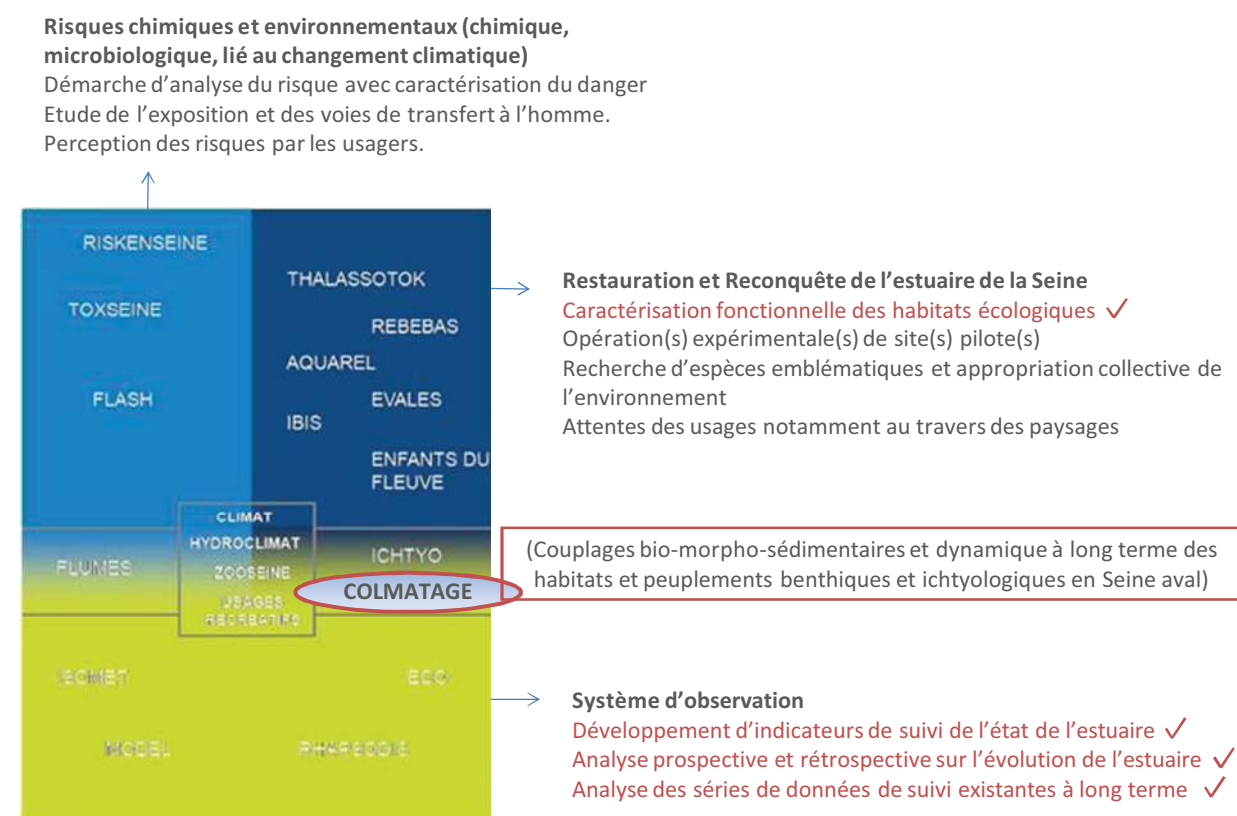


Figure 3 : Organisation et thématiques abordées dans le programme Seine Aval 4. En rouge figurent les thèmes abordés dans le cadre du projet COLMATAGE.

Le projet COLMATAGE trouve sa place entre les deux axes de recherche que sont "Restauration et reconquête" et "Systèmes d'observation". La fonction de nourricerie que doit assurer l'estuaire de Seine pour le renouvellement des stocks de poissons adultes est d'un grand enjeu écologique et économique et mérite toute notre attention. Si les composantes de ce système (macrofaune benthique, poissons, sédiments et hydrodynamique) ont été bien étudiées séparément, les relations entre-elles le sont bien moins actuellement. Il était donc indispensable de palier à ce manque de connaissance pour orienter au mieux les futures décisions d'aménagement et de préservation touchant ce secteur. A ce titre les discussions s'orientent

actuellement vers l'établissement d'une stratégie d'observation à long terme du compartiment benthique.

Les objectifs visés par le projet sont donc (i) le recensement des données existantes sur le territoire étudié et leur bancarisation, (ii) l'analyse conjointe de l'évolution morpho-sédimentaire, des communautés benthiques et ichthyologiques, intertidales et subtidales, (iii) la définition d'une typologie des habitats marins estuariens, (iv) la proposition à terme d'une stratégie d'observation de l'estuaire et la partie orientale de la baie de Seine (sédiment, faune benthique et démersale) et (v) l'utilisation de la connaissance de la dynamique des habitats et peuplements pour décrire leur évolution probable en fonction des scénarii d'aménagements ou des variations des forçages climatiques. Il regroupe pour cela sept équipes de scientifiques : des gestionnaires de bases de données, des modélisateurs, des sédimentologues, des benthologues, des ichthyologues. La coordination est assurée par le GIP Seine-Aval (Figure 4).

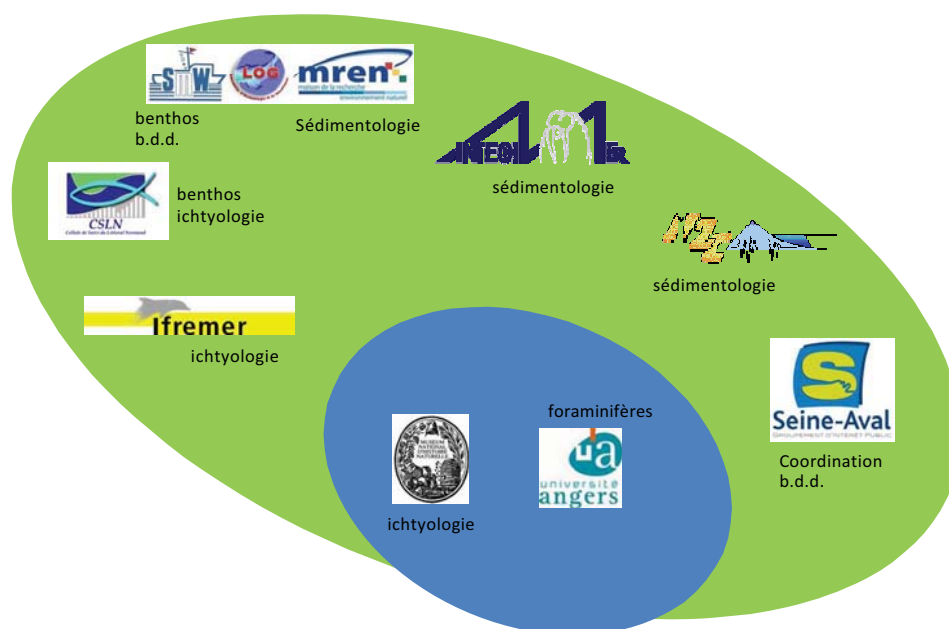




Figure 4: Les partenaires du projet COLMATAGE


Outre la mise en commun des données acquises auparavant dans Seine-Aval ou d'autres études notamment contractuelles et financées par le GPMR (Grand Port Maritime de Rouen) et le GPMH (Grand Port Maritime du Havre), l'organisation de nouvelles campagnes d'échantillonnage, communes entre sédimentologues, benthologues et ichthyologues, a été entreprise durant trois automnes (2008-2009-2010) sur les fonds meubles subtidaux de la partie orientale de la baie de Seine et de son estuaire aval. Le point fort des campagnes d'échantillonnage du macrobenthos dans COLMATAGE repose sur cette stratégie commune afin d'aborder la variabilité interannuelle et le couplage entre les différentes disciplines.

## *¶ Objectifs de l'étude*

Mon étude repose sur trois principaux objectifs liés au projet COLMATAGE :

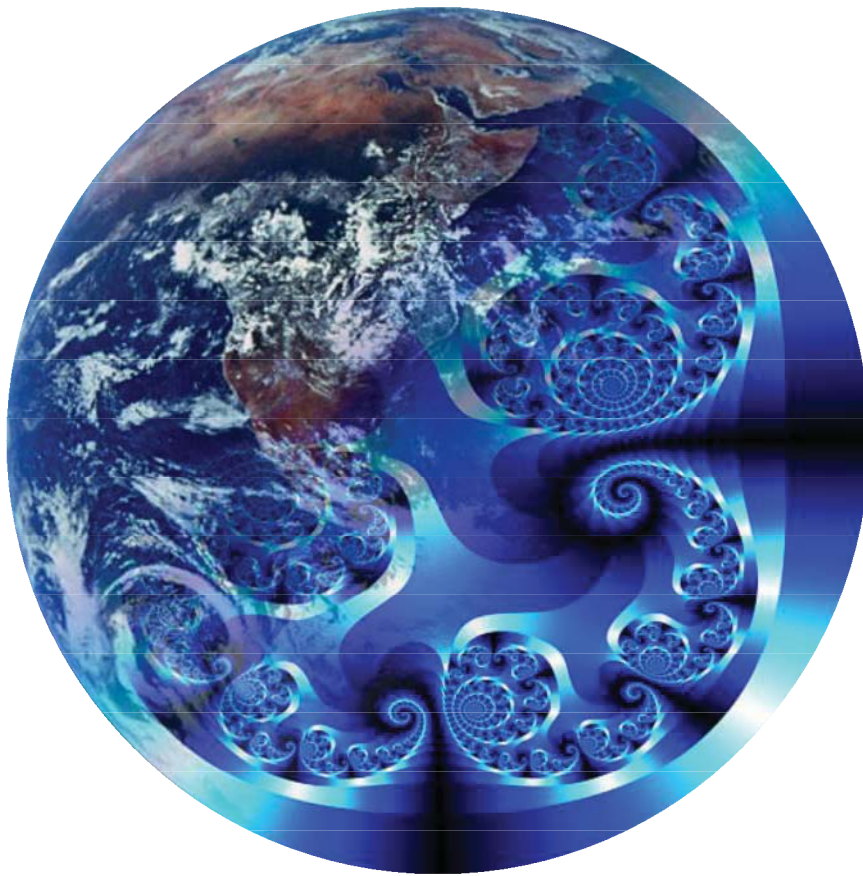
 Acquérir de nouvelles données. Cet objectif comprend (i) une partie terrain consistant à participer aux campagnes d'échantillonnage communes qui se sont déroulées aux automnes 2008 et 2009 à bord des navires océanographiques le "Côte d'Aquitaine" et le "Côtes de la Manche" et (ii) une partie laboratoire consistant au dépouillement des échantillons prélevés (analyses granulométriques, tri et détermination de la faune).

 Faire un état des lieux de la structuration du compartiment benthique (macrofaune benthique et sédiments) à partir des données de macrofaune benthique et de sédiments nouvellement acquises en 2008 et 2009.

 Analyser, en ce qui concerne la macrofaune benthique et les sédiments, les jeux de données historiques (recensées dans le cadre du projet COLMATAGE) et récentes (nouvellement acquises dans le cadre de ma thèse, lors des campagnes d'échantillonnage 2008 et 2009 de COLMATAGE).

Les résultats doivent permettre de discuter autour de la stratégie d'observation à long terme du compartiment benthique subtidal du secteur "baie de Seine Orientale – embouchure" et amener à des propositions.

*« To do science is to search for repeated patterns... But not all naturalists want to do science; many take refuge in nature's complexity as a justification to oppose any search of patterns ».* **MacArthur Robert** (1972)



*« Toute stratégie de recherche qui consisterait à gommer cette variabilité ou à la rejeter comme un bruit de fond dépourvu de signification ne peut conduire qu'à l'échec ».* **Den Boer** (1968) in Barbault (1997).

# SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>7</b>
<b>CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU SECTEUR ETUDIE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE DES RELATIONS FAUNE - SEDIMENTS.....</b>	<b>12</b>
<b>I. SITUATION GEOGRAPHIQUE, GEOMORPHOLOGIE ET ANTHROPISATION.....</b>	<b>12</b>
A. LE SYSTEME "MANCHE - BAIE DE SEINE" .....	12
B. LE SYSTEME "BAIE DE SEINE ORIENTALE – EMBOUCHURE" .....	13
C. LES TRAVAUX A L'EMBOUCHURE ET BATHYMETRIE.....	14
<b>II. HYDROLOGIE ET HYDRODYNAMISME .....</b>	<b>16</b>
A. LE SYSTEME "MANCHE – BAIE DE SEINE" .....	17
1. <i>Hydrodynamisme et hydrologie</i> .....	17
2. <i>Température et salinité</i> .....	21
B. LE SYSTEME "BAIE DE SEINE ORIENTALE – EMBOUCHURE" .....	23
1. <i>Hydrodynamisme et hydrologie</i> .....	23
a. L'intensité des courants de marée .....	23
b. Le vent et la houle .....	24
c. Gradient de densité .....	25
2. <i>Température et salinité</i> .....	26
<b>III. GRADIENTS ET DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE .....</b>	<b>28</b>
A. LE SYSTEME "MANCHE – BAIE DE SEINE" .....	28
1. <i>Gradients et faciès sédimentaires</i> .....	28
2. <i>Evolution à long terme et dynamique saisonnière</i> .....	30
a. Evolution à long terme en Manche orientale .....	30
b. Evolution à long terme et dynamique saisonnière en baie de Seine .....	31
B. LE SYSTEME "BAIE DE SEINE ORIENTALE – EMBOUCHURE" .....	32
1. <i>Gradients et faciès sédimentaires</i> .....	32
2. <i>Dynamique sédimentaire</i> .....	35
a. Evolution à long terme de la couverture sédimentaire.....	35

i. Evolution à l'embouchure .....	35
ii. Evolution du système "baie de Seine Orientale – embouchure" .....	37
iii. Evolution en baie de Seine Sud-orientale .....	39
b. Dynamique saisonnière de la couverture sédimentaire .....	40
i. L'estuaire aval .....	40
ii. Estuaire aval et baie de Seine Sud-orientale .....	46
iii. La baie de Seine Nord-orientale .....	48
<b>IV. MACROFAUNE BENTHIQUE ET FACTEURS STRUCTURANTS .....</b>	<b>50</b>
A. LE SYSTEME "MANCHE - BAIE DE SEINE" .....	50
1. Unités "bentho-sédimentaires" .....	50
2. Evolution à long terme et dynamique saisonnière .....	53
a. Evolution en à long terme en Manche Orientale .....	53
b. Evolution à long terme et dynamique saisonnière en baie de Seine .....	53
B. LE SYSTEME "BAIE DE SEINE ORIENTALE – EMOUCHURE" .....	56
1. Unités "bentho-sédimentaires" .....	56
2. Evolution à long terme du système "baie de Seine Orientale – embouchure" .....	58
3. Dynamique inter-annuelle et évolution à long terme de la communauté à <i>Abra alba</i> – <i>Pectinaria - koreni</i> .....	59
4. Dynamique pluriannuelle à saisonnière à l'embouchure .....	61
<b>V. CONCLUSIONS .....</b>	<b>62</b>

## **CHAPITRE 2 : LES BASES DE DONNEES MACROBENTHIQUES ET SEDIMENTAIRES EXPLOITEES DANS CETTE ETUDE .....**

**65**

<b>I. PRESENTATION DES DONNEES HISTORIQUES (1978-2006) .....</b>	<b>65</b>
A. LES DONNEES MACROBENTHIQUES (BASE MABES) .....	65
B. LES DONNEES SEDIMENTAIRES (BASE " SEDIMENTS ") .....	67
C. LES DONNEES FAUNE-SEDIMENT EXPLOITEES DANS CETTE ETUDE .....	70
<b>II. PRESENTATION DES DONNEES COLMATAGE 2008 ET 2009 ACQUISES AU COURS DE CETTE THESE .....</b>	<b>71</b>
A. STRATEGIE ET DEROULEMENT DES CAMPAGNES EN MER.....	71
B. RECOLTE ET TRAITEMENT DES ECHANTILLONS DEDIES A L'ANALYSE FAUNISTIQUE.....	73
1. Travail à bord.....	73

2.	<i>Travail au laboratoire</i>	75
a.	Tri	75
b.	Détermination et comptages	78
c.	Biométrie	79
d.	Biomasses	80
C.	RECOLTE ET TRAITEMENT DES ECHANTILLONS DEDIES A L'ANALYSE SEDIMENTAIRE ASSOCIEE	81
1.	<i>Travail à bord</i>	81
2.	<i>Travail au laboratoire</i>	83
a.	Granulométrie	83
i.	Granulométrie par tamisage sur les échantillons prélevés à la benne Van Veen	83
ii.	Granulométrie Laser sur les échantillons prélevés à la benne Shipeck	84
b.	Matière Organique (MO)	85
D.	LES DONNEES FAUNE-SEDIMENT EXPLOITEES DANS CETTE ETUDE	86

### **CHAPITRE 3 : ETAT DES LIEUX (2008-2009) DU COMPARTIMENT BENTHIQUE (MACROFAUNE ET SEDIMENTS) DU SYSTEME "BAIE DE SEINE ORIENTALE – EMBOUCHURE" ET CHANGEMENTS A LONG TERME (1988-2009)..... 87**

#### **I. CARACTERISTIQUES ET ORGANISATION HYDRO-MORPHO-SEDIMENTAIRE DANS LE CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE ET ANTHROPIQUE DU SYSTEME, PROBLEMATIQUE DE LA STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE DANS L'ETUDE DES RELATIONS MACROFAUNE BENTHIQUE – SEDIMENTS. .... 87**

A.	BATHYMETRIE	90
B.	CARACTERISTIQUES EDAPHIQUES	92
1.	<i>Granulométrie des sédiments : état actuel (2008-2009) et évolution à long terme (1988-2009)</i>	92
a.	Regroupement des fractions sédimentaires en classes granulométriques majeures	92
b.	Distribution spatiale des différentes classes granulométriques obtenues à l'issue des prélèvements réalisés à la benne Van Veen	92
i.	Distribution des fines	92
ii.	Teneur en Matière Organique dans les sédiments superficiels	95
iii.	Distribution des sables fins	95
iv.	Distribution des sables moyens	97
v.	Distribution des sables grossiers	98
vi.	Distribution spatiale des graviers et coquilles	99

2.	<i>Texture sédimentaire : état actuel (COLMATAGE 2008-2009)</i>	100
a.	Analyse complémentaire des granulométries des prélèvements réalisés à la benne Van Veen et à la benne Shipeck, confrontation avec les photographies des prélèvements	100
i.	Cas où aucune différence n'est décelable entre les deux approches	100
ii.	Cas où des différences s'observent au sein des fractions sableuses	101
iii.	Cas où des différences s'observent sur les pourcentages de vase	101
b.	Principe du codage effectué sur les photographies des prélèvements	102
i.	Présence de vase fluide en surface	103
ii.	Présence de galets mous en surface	104
iii.	Notion de remaniement sédimentaire	105
iv.	Notion de cohésion sédimentaire	106
v.	Variation verticale de faciès	106
vi.	Hétérogénéité entre répliqués	107
3.	<i>Définition des faciès sédimentaires, différents points de vue : état actuel (COLMATAGE 2008-2009)</i>	108
a.	Méthodes de classification	108
i.	Diagramme de Folk (1954) modifié et distribution spatiale des géo-faciès identifiés	108
ii.	Classification de Larssonneur modifiée (Lesourd, 2000) et distribution spatiale des géo-faciès identifiés	110
b.	Méthodes d'ordination	112
C.	DISCUSSION ET PROPOSITION D'UNE SYNTHÈSE DE L'ORGANISATION SÉDIMENTAIRE DANS LE SYSTÈME "BAIE DE SEINE ORIENTALE – EMBOUCHURE"	121
1.	<i>Organisation actuelle (2008-2009) des sédiments et problématique de la stratégie de leur échantillonnage au sein du système "baie de Seine Orientale – embouchure"</i>	121
2.	<i>Synthèse de l'organisation sédimentaire dans le contexte hydrodynamique et anthropique du système, détection des changements à long terme</i>	125
3.	<i>Organisation sédimentaire et étude des relations benthos-sédiments</i>	130

## **II. CARACTERISTIQUES ET ORGANISATION DE LA MACROFAUNE BENTHIQUE EN RELATION AVEC SON ENVIRONNEMENT HYDRO-MORPHO-SEDIMENTAIRE COMPLEXE..... 131**

A.	LES ESPÈCES RENCONTRÉES : CAMPAGNES COLMATAGE 2008 - 2009	131
a.	Sur la base d'un échantillonnage unique en 2008	131
i.	Les cinquièmes répliqués	131
ii.	Le chenal de navigation	131
iii.	Les autres stations non ré-échantillonnées	132



b. Sur la base d'un effort d'échantillonnage commun .....	132
i. Espèces communes aux deux années échantillonnées .....	132
ii. Espèces rencontrées uniquement en 2008.....	133
iii. Espèces rencontrées uniquement en 2009.....	133
B. RICHESSES SPECIFIQUES ET ABONDANCES.....	134
1. <i>Distribution spatiale des richesses spécifiques (esp. / 0.4 m<sup>2</sup>)</i> .....	134
a. Campagnes COLMATAGE (2008-2009) .....	134
b. Evolution à long terme des richesses spécifiques : campagnes PECTOW (1988-2006) ....	136
2. <i>Distribution spatiale des abondances (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>)</i> .....	137
a. Campagnes COLMATAGE (2008-2009) .....	137
b. Variabilité inter-annuelle (2008-2009) du recrutement d'espèces dominantes .....	139
c. Evolution à long terme : campagnes PECTOW (1988-2006) .....	141
3. <i>Conclusions-discussion : point de vue de l'organisation de la macrofaune benthique en relation avec l'organisation sédimentaire dans le contexte hydrodynamique et anthropique du système.</i> .....	142
C. ASSEMBLAGES FAUNISTIQUES : CAMPAGNES COLMATAGE 2008-2009 .....	146
a. Définitions d'espèces rares .....	146
b. Classification hiérarchique sur les résultats d'une PACP.....	150
i. Regroupements de stations par assemblages faunistiques.....	151
ii. Regroupement de prélèvements (réplicats) par assemblages faunistiques.....	156
2. <i>Conclusion-discussion : vers une approche spécifique de l'étude des relations benthos-sédiments</i> .....	156
D. L'ANALYSE DES NICHES SEDIMENTAIRES DE LA MACROFAUNE BENTHIQUE .....	158
1. <i>Analyse OMI (Outlying Mean Index) des relations macrobenthos-sédiments</i> .....	158
2. <i>Choix des variables sédimentaires</i> .....	159
3. <i>Choix des espèces</i> .....	159
i. Données récentes COLMATAGE (2008-2009) .....	159
ii. Données historiques PECTOW (1988-1991-1996-2001-2006) .....	160
4. <i>Résultats obtenus à partir des données récentes COLMATAGE</i> .....	160
i. Regroupement des stations par l'ACP sur les classes granulométriques .....	160
ii. Résultats de l'analyse OMI après sélection des espèces .....	162
5. <i>Résultats obtenus à partir des données historiques PECTOW</i> .....	170
6. <i>Conclusion-discussion : relations espèces-sédiments et changements à long terme du compartiment benthique</i> .....	172

<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>180</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>191</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>205</b>

# INTRODUCTION

L'écologie a été définie pour la première fois par Haeckel (1869) comme l'étude des interactions entre organismes vivants et leur environnement, puis plus tard par Krebs (1972) comme l'étude des interactions déterminant la distribution et l'abondance des organismes. Les écosystèmes (ou systèmes écologiques) intégrant toutes ces interactions, Barbault (1997) définit l'écologie comme l'étude de ces écosystèmes. Cependant, l'étude de tels systèmes et de l'ensemble des interactions dont il est le siège s'avère actuellement complexe, voire impossible. En effet, outre la variabilité dans l'espace et dans le temps qui le caractérise, tout écosystème est contenu lui-même dans un système plus vaste pouvant lui-même être appelé écosystème. Ces derniers sont interdépendants dans le cadre de la biosphère (Frontier et Pichot-Viale, 1998).

L'écologie benthique se place au niveau du domaine (ou compartiment) benthique, qui correspond à une mince fraction de la biosphère que sont les fonds des lacs, des rivières, des mers et des océans. Les organismes vivant à l'interface eau-sédiments, et même dans les sédiments, sont communément appelés organismes benthiques (benthos). Ils peuvent être classés en trois grandes catégories selon que les individus vivent à proximité du fond avec de grandes capacités de déplacement (épifaune vagile), ou fixés sur le substrat avec des capacités de déplacement extrêmement limitées (épifaune sessile), ou encore au sein même du substrat (endofaune). On distingue : (i) le méio-benthos, individus essentiellement vagiles dont la taille est comprise entre 40  $\mu\text{m}$  et 1 mm, (ii) le macrobenthos, invertébrés benthiques vagiles et sédentaires dont la taille est supérieure à 1 mm (iii) le méga-benthos, dont la taille est supérieure à 10 mm, puis (iv) le supra-benthos regroupant les organismes vivant dans la couche d'eau juste au dessus du fond, faisant la transition entre le domaine benthique et pélagique. Bien que l'attribution d'une de ces catégories à une espèce particulière peu parfois s'avérer délicate compte tenu de la diversité des modes de vie existant chez ces organismes benthiques, ce schéma général témoigne des étroites relations existantes entre ces deux composantes benthiques (faunistique et sédimentaire).

\*\*\*\*\*

Les premières prospections du domaine benthique en Manche à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle par Cabioch et ses collaborateurs, ont permis de définir des unités "benthosédimentaires", témoignant de l'étroite relation existante entre la macrofaune benthique et son environnement

hydrosédimentaire. A l'échelle de la Manche comme à l'échelle de la baie de Seine Orientale, les communautés définies sont en accord avec les caractéristiques hydro-sédimentaires. Les délimitations entre ces unités sont appréciables sans grande difficultés, tant les types sédimentaires peuvent être contrastés.

De nombreux travaux de reconnaissance de la distribution du benthos des fonds meubles de la baie de Seine Orientale ont succédé à ces premières prospections. Motivées par divers objectifs en lien avec les diverses pollutions, aménagements et variations naturelles, elles ont été menées à des échelles spatio-temporelles variées allant de la semaine à la décennie, sur la base d'une ou plusieurs dizaines de stations. Quelle que soit l'échelle spatio-temporelle à laquelle elles se sont déroulées, elles ont généralement étudié la réponse de la macrofaune benthique aux variations de son environnement. Il est ainsi possible aujourd'hui d'aborder l'étude de l'écosystème selon une approche fonctionnelle.

\*\*\*\*\*

Alors qu'à l'échelle de la Manche comme de la baie de Seine Orientale, il a été montré que la granulométrie des sédiments, elle-même influencée par l'intensité des courants de marée, était le facteur principal de structuration de la faune, les études qui se sont placées à l'échelle de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* (caractéristique des fonds sablo-vaseux de la baie de Seine Orientale) ou encore à celle de la communauté à *Macoma balthica* (caractéristiques des fonds envasés à l'embouchure), se sont heurtées à la difficulté de mettre en avant des relations claires entre les assemblages faunistiques et la nature des sédiments (Thiébaud, 1994 ; Barnay, 2003 ; Janson, 2007).

L'étude des relations entre la structuration de la macrofaune benthique et les caractéristiques granulométriques d'un ensemble sédimentaire sablo-vaseux s'avère complexe en milieu côtier anthropisé sous l'influence d'une dynamique estuarienne, d'un régime de marée mégatidale et de la houle. La macrofaune benthique de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* y est soumise à de multiples forçages et il est probable que si les caractéristiques granulométriques seules ne suffisent plus à expliquer sa structuration et son organisation à cette échelle, c'est que les caractéristiques sédimentaires prises en compte dans les analyses comme les pourcentages de tailles de grains ne sont plus suffisantes et/ou que d'autres facteurs peuvent en être responsables.

Dans l'embouchure de l'estuaire de Seine puis dans les fonds meubles subtidiaux alentours, se mélangent les eaux salées marines et les eaux douces du fleuve. Dans le secteur, les courants de marée résiduels engendrés par la rencontre des masses d'eau douces et salées, par la morphologie de la côte et du fond, sont également influencés par les débits fluviaux et les conditions

météorologiques. Voies privilégiées de communication et de commerce, les traces d'anthropisation y sont marquées : endiguements, chenalisations, dragages, rejets de dragages... Les nombreuses et diverses activités industrielles qui s'y sont développées, font de ce système lui-même une menace permanente de contamination (Dauvin, 2008). Situé entre le milieu continental et le milieu marin, il constitue également une zone de transit et de stockage de matériaux fins sous influence hydrodynamique. Les sables et les vases accumulées sont facilement remobilisables, leurs structurations et dynamiques peuvent être vues comme les réponses à des conditions hydrodynamiques aux caractéristiques, fréquences et intensités contrastées.

Les populations macrobenthiques qui y vivent, ayant leur propre sensibilité et tolérance aux différentes contraintes auxquelles elles sont soumises, répondent et se répartissent en conséquence. Les variations naturelles de leurs densité et richesse spécifique s'y révèlent influencées à la fois par des variations cycliques ou événementielles de nombreux facteurs environnementaux (hydrodynamisme, hydrologie, sédimentologie et variations météorologiques), mais également par des facteurs biotiques (succès du recrutement, dispersion larvaire ou encore relations de facilitation/exclusion entre espèces, prédation, espèces invasives, affinité et tolérance). L'absence de relations claires entre la faune et son environnement sédimentaire suggère que dans un environnement intrinsèquement variable, l'adaptation des organismes est un pré-requis indispensable à leur survie (Ysebaert et *al.*, 2002, Ysebaert et Herman, 2002).


\*\*\*\*\*


Il existe une multitude d'approches pour aborder les questions de compréhension du fonctionnement d'un système aussi complexe, dont les forçages pour la faune sont variés. Face au principe hiérarchique qui régit l'organisation des paramètres environnementaux et de la matière vivante à toutes les échelles d'observation au sein d'un écosystème donné, l'écologue est confronté à devoir (i) choisir, selon la question posée, un nombre restreint et pertinent de descripteurs et (ii) se placer aux bonnes échelles d'observation (Blanc, 2000).


Le succès d'une telle démarche semble néanmoins reposer sur ses connaissances. Du nombre et de la qualité des observations déjà mises en évidences, reposera le degré de ses connaissances et donc la pertinence de son choix. L'intérêt pour le développement de stratégies d'observation à long terme du système qu'il étudie prend ici tout son sens. Or, l'existence de séries d'observation à long terme est au cœur des préoccupations actuelles et la stratégie de leur mise en œuvre doit

être pertinente par rapport à ce que l'on veut observer, ce qui nécessite au préalable des connaissances de fonctionnement.

C'est là le cœur de la problématique de ma thèse et des questions sous-jacentes qui sont abordées:

 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"?

 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"?

 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"?

\*\*\*\*\*

Mon mémoire de thèse s'organise autour de trois principaux chapitres :

Le Chapitre 1 permet de faire le bilan des connaissances acquises sur l'hydrodynamisme, la structure et la dynamique sédimentaire et macrobenthique, en replaçant le système "baie de Seine Orientale – embouchure" étudié ici à une échelle plus large, celle de la Manche.

Il présente différentes approches et différentes échelles d'observation ayant servi à définir jusqu'alors les relations entre la macrofaune benthique et son environnement hydro-sédimentaire. Le sédiment considéré sur la base de sa granulométrie ne suffisant plus à expliquer la structuration de la macrofaune benthique à l'échelle des sables envasés de la baie de Seine Orientale, il permet de rendre compte de l'existence de nombreux facteurs pouvant s'y exprimer au travers de la structuration de la macrofaune benthique. Plus qu'un simple recensement de ces facteurs, ce bilan permet de rendre compte de leur potentiel structurant pour la macrofaune benthique à l'échelle du système étudié, au travers de leurs échelles de variabilité spatio-temporelle.

Le Chapitre 2 est consacré à la présentation des données disponibles et des données qui seront par la suite exploitées. Une première partie concerne les données des bases historiques MABES et "Sédiments", rassemblées dans le cadre de COLMATAGE, et la deuxième partie concerne les données nouvellement acquises lors des campagnes d'échantillonnage communes

COLMATAGE réalisées en 2008 et 2009 dans le cadre de ma thèse, ainsi que le protocole détaillé du traitement des échantillons (benthos et sédiments). Ce descriptif illustre la diversité des stratégies utilisées pour l'étude du compartiment benthique (macrofaune benthique et sédiments), témoignant à la fois des besoins différents propre à chaque problématique et du caractère parfois non concerté qui ont motivé les nombreuses campagnes d'échantillonnage du benthos dans le secteur depuis de nombreuses années. De ces stratégies d'échantillonnage variées, il en résulte l'acquisition de données le plus souvent non comparables directement, aussi bien au sein d'une même discipline (méthodologies différentes) qu'entre ces disciplines (manque d'échantillonnage conjoint). Un choix a donc été réalisé et les données exploitées dans cette étude sont précisées.

Le Chapitre 3 est consacré aux résultats intégrant à la fois (i) mon approche de l'étude des relations benthos – sédiments au sein du système "baie de Seine orientale – embouchure", sur la base de l'analyse des données historiques, récentes ainsi que des connaissances antérieures et (ii) un point de vue synthétique de l'organisation de cet écosystème, privilégiant comme composante centrale le compartiment benthique (macrofaune et sédiments). Les résultats découlent de l'analyse des données récemment acquises grâce aux campagnes d'échantillonnage menées dans le cadre du projet COLMATAGE, mais aussi d'une partie des données historiques sélectionnées de la base MABES. Les interprétations sont la résultante des résultats nouvellement acquis, mais aussi de ceux d'études antérieures.

# CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU SECTEUR ETUDIE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE DES RELATIONS FAUNE - SEDIMENTS

## I. SITUATION GEOGRAPHIQUE, GEOMORPHOLOGIE ET ANTHROPISATION

### A. LE SYSTEME "MANCHE - BAIE DE SEINE"

La Manche, dont on distingue le bassin occidental (Manche Occidentale) du bassin oriental (Manche Centrale et Manche Orientale), forme un bras de mer épicontinentale mégatidale, et communique avec la mer du Nord à l'est et l'océan Atlantique à l'ouest. D'une superficie d'environ 5000 km<sup>2</sup>, la baie de Seine est largement ouverte au Nord sur la Manche centrale. Elle est délimitée à l'ouest par la pointe du Cotentin à Barfleur, au sud par les côtes du Calvados et à l'est par les côtes du Pays de Caux du Havre à Antifer (Figure 5).

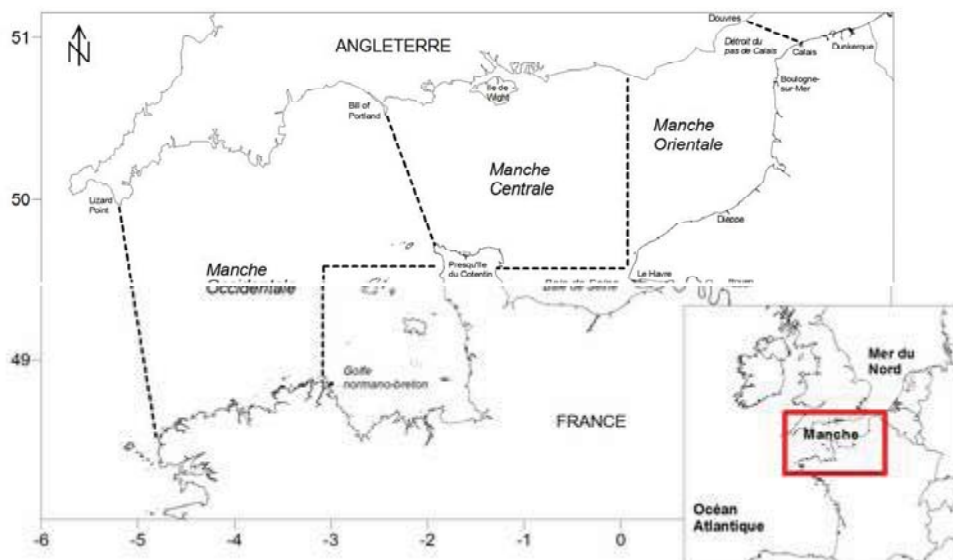


Figure 5 : Situation géographique de la Manche et de la baie de Seine (dans Foveau 2009).

En Manche les profondeurs n'excèdent pas les 174 m, elles diminuent d'ouest en est et du large vers les côtes. La baie de Seine montre une grande régularité morphologique où les profondeurs sont maximales (entre 30 et 40 m) dans sa partie centrale et diminuent graduellement vers les côtes (Figure 6).



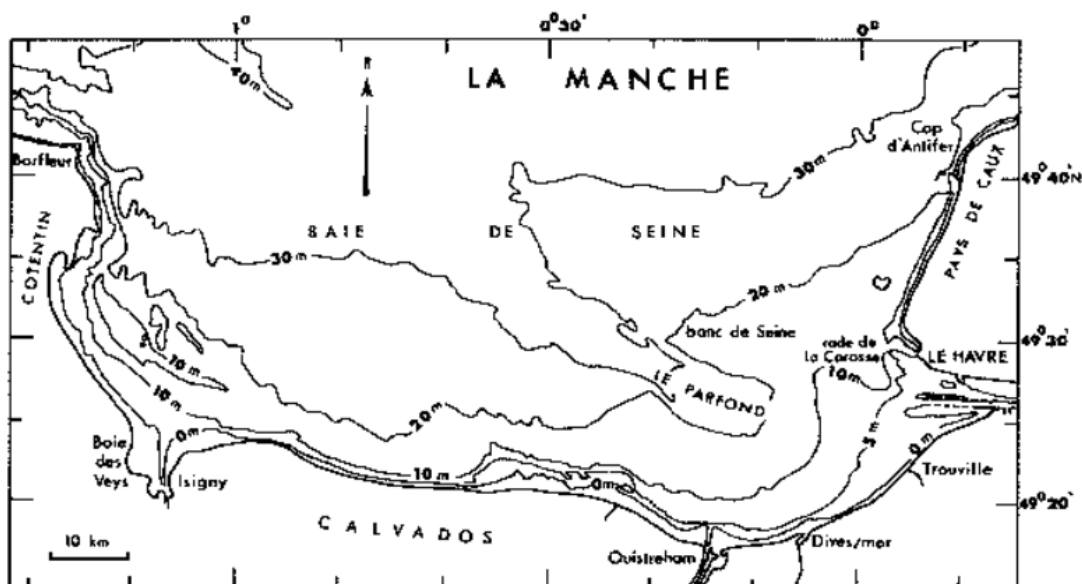
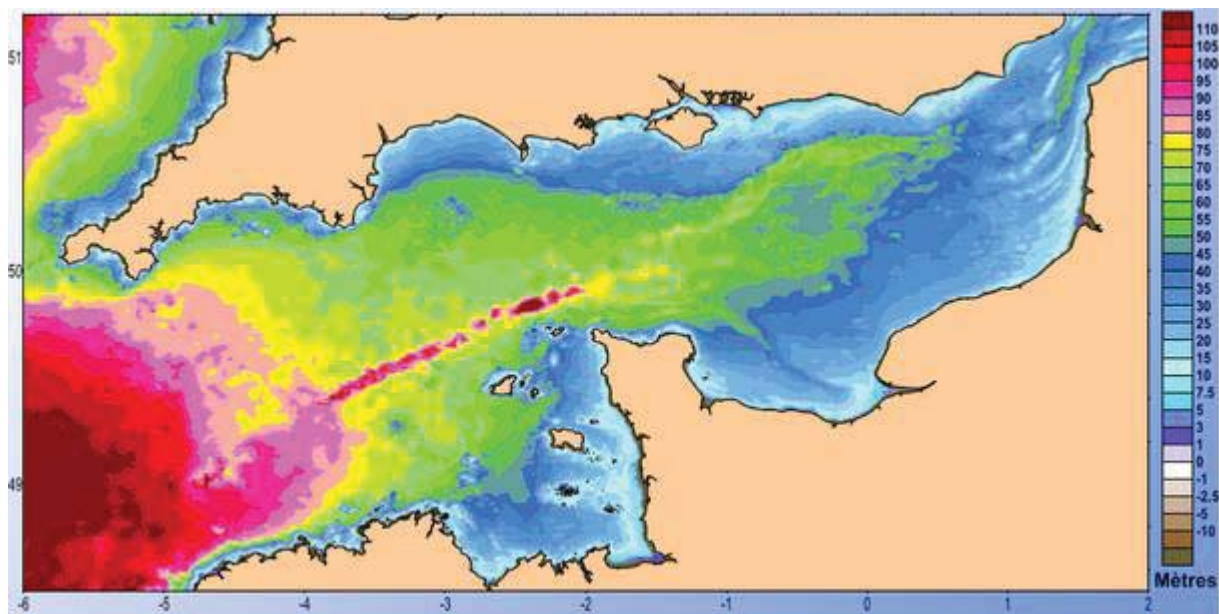


Figure 6 : Carte de bathymétrie en Manche (Données de l'IFREMER avec l'autorisation de P. Bailly du Bois, IRSN, Octeville, France dans Foveau (2009)) (haut) et en baie de Seine (bas).

## B. LE SYSTEME "BAIE DE SEINE ORIENTALE – EMBOUCHURE"

Le présent secteur d'étude intègre les fonds subtidiaux de la partie orientale de la baie de Seine et de son embouchure n'excédant pas les 20 m, excluant ainsi la zone du Parfond, zone plus profonde héritée de l'ancienne paléovallée de la Seine. D'une superficie d'environ 400 km<sup>2</sup>, il est délimitée au nord-est par Antifer, au sud-ouest par Ouistreham et se prolonge dans l'estuaire aval jusqu'à la Risle (Figure 7). Le terme "estuaire aval" provient ici d'une simplification de la classification de Faifbridge (1980) qui divise l'estuaire de Seine en trois

principaux ensembles en fonction des conditions de salinité. Il comprend ainsi l'estuaire marin (faisant référence à la zone située à l'aval de Honfleur jusqu'à la zone du Parfond) et l'estuaire moyen (faisant référence à la zone de mélange des eaux douces et salées entre Vieux Port et Honfleur). L'estuaire fluvial (ou "estuaire amont" selon la classification simplifiée) fait référence à la zone d'eau douce soumise à la marée dynamique de Vieux Port jusqu'au barrage de Poses. Nous ferons plutôt référence à l'embouchure, tel que précisé sur la Figure 1.

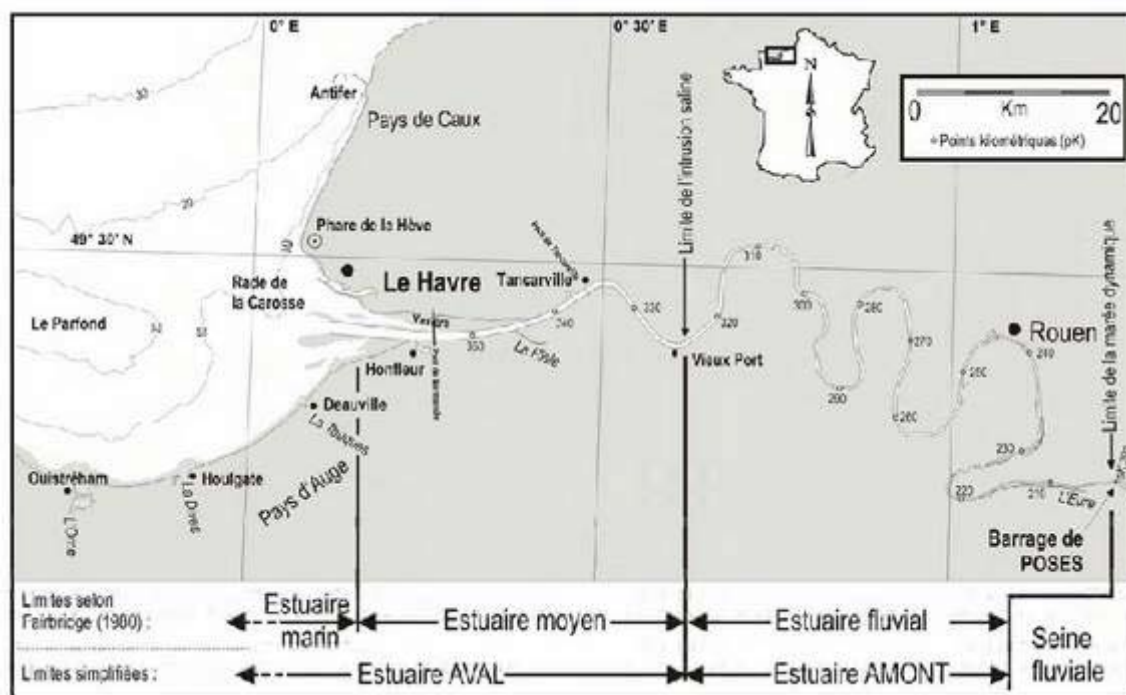


Figure 7 : Situation géographique de la baie de Seine Orientale et de son embouchure. Délimitations selon Fairbridge (1980) et simplifiées.

### C. LES TRAVAUX A L'EMBOUCHURE ET BATHYMETRIE

L'ensemble des aménagements ont été entrepris depuis le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, essentiellement dans le but d'améliorer les conditions de navigation entre le Port de Rouen et la mer. La Figure 8 représente une synthèse de l'ensemble de ces travaux réalisés jusque dans les années 1990. Après une période d'une dizaine d'années sans intervention, les constructions liées au projet "Port 2000" visant à augmenter la surface du Port du Havre ont débuté en 2001. Ces aménagements se sont accompagnés d'importantes phases de dragage des fonds sédimentaires et les caractéristiques morpho-sédimentaires de l'embouchure de l'estuaire de la Seine ont été profondément modifiées (Avoine, 1981 ; Lesourd, 2000). Ils sont à l'origine du cloisonnement

physique de l'embouchure, de la réduction du volume de l'estuaire et des vasières intertidales, ainsi que des modifications bathymétriques.

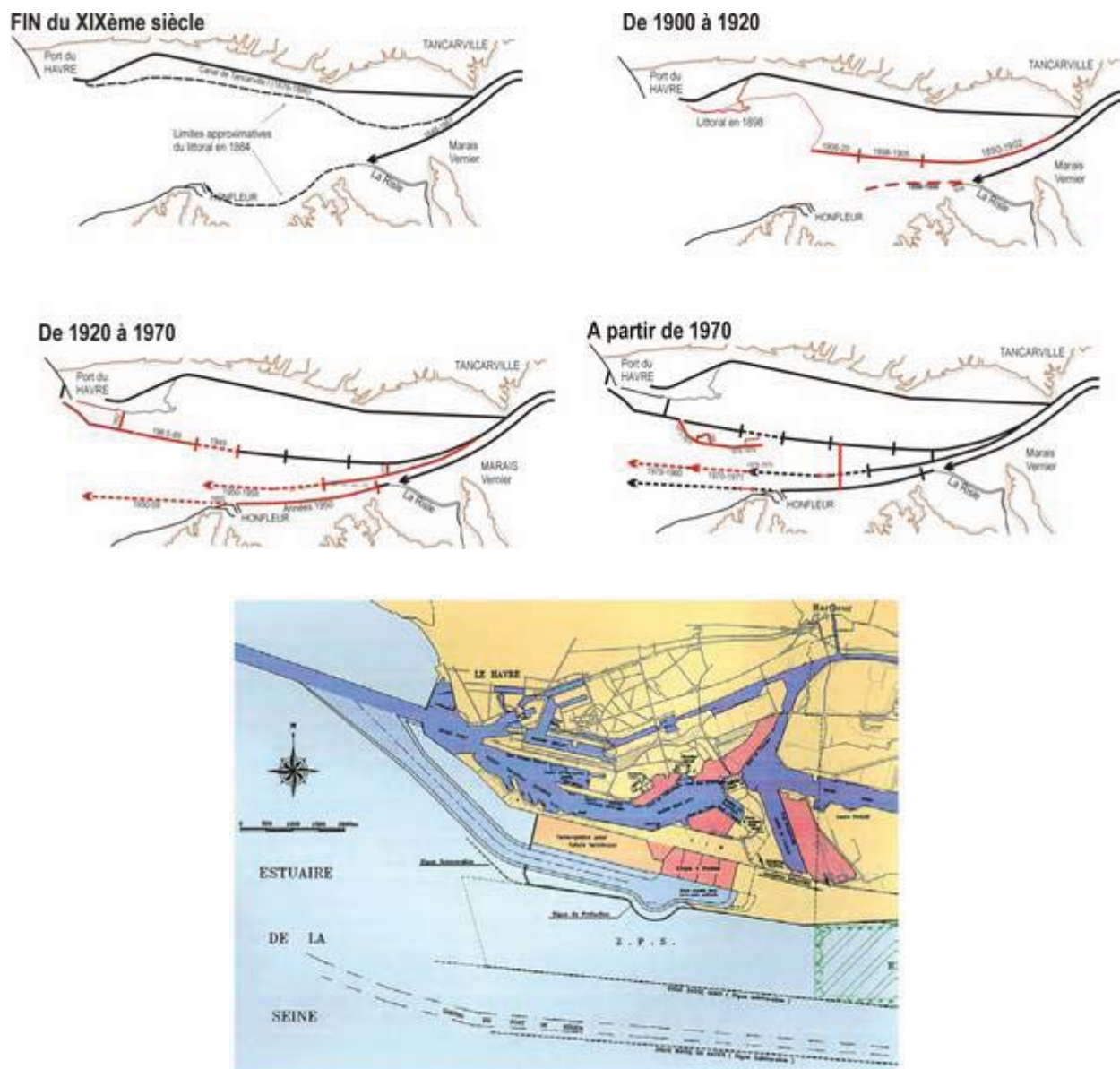


Figure 8 : Historique des aménagements successifs dans l'embouchure de la Seine entre la fin du XIXème siècle jusque des les années 1990 (dand Lesourd, 2000) (haut) et plan d'extension du port du Havre dans le cadre du projet Port 2000 (Source : [www.havre-port.net/pahweb.html](http://www.havre-port.net/pahweb.html)) (bas).

La Figure 9 représente les cartes bathymétriques montrant l'évolution entre 1834 et 2005 des fonds en fonction des aménagements à l'embouchure de l'estuaire de la Seine, d'après les données du Grand Port Maritime de Rouen. Comme précisé par Lesourd (2000), la géométrie de l'estuaire résulte à la fois des sédiments qui s'y sont progressivement accumulés et des travaux d'aménagement qui ont modelé la zone. Nous assistons ainsi au colmatage de ces fonds (accéléré par la main de l'homme), et à la progradation vers la mer des bancs sableux de l'embouchure.



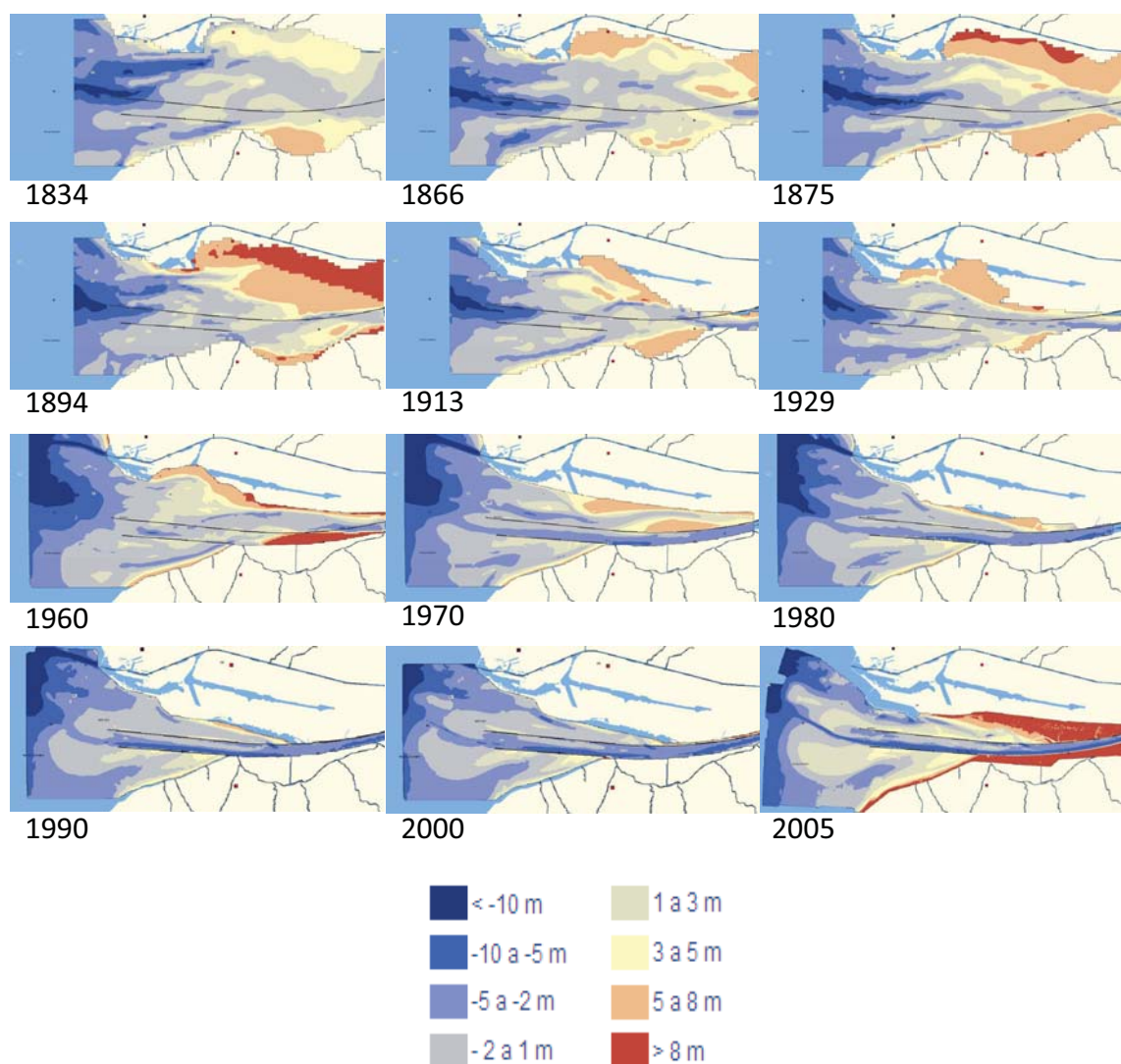


Figure 9 : Cartes bathymétriques montrant l'évolution entre 1834 et 2005 des fonds à l'embouchure de la Seine en fonction des aménagements (BD Alti 500 m, BD Carthage, données du Grand Port Maritime de Rouen). Cartes extraites du site internet du GIP Seine-Aval (Cartographie dynamique) : <http://seine-aval.crihan.fr>.

## II. HYDROLOGIE ET HYDRODYNAMISME

De nombreuses études hydrologiques, les travaux du SHOM et les modélisations en Manche sur les marées et les phénomènes qu'elles induisent (Lacombe, 1951 ; Lacombe & Lemièrre, 1953 ; Sager, 1963 ; Hyacinthe & Kravtchenko, 1967 ; Larssonneur, 1971 ; Pingree & Maddock, 1977 ; Salomon & Breton, 1991) permettent aujourd'hui d'apprécier la morphologie des fonds marins ainsi que les principales caractéristiques hydrologiques et hydrodynamiques des masses d'eau. Les travaux du SHOM portant sur des mesures *in situ* obtenues par des courantomètres ainsi que les modélisations hydrodynamiques (Le Hir, 1980 ; Le Hir et L'Yavanac, 1986 ; Le Hir

et *al.*, 1985, Salomon & Breton, 1991), apportent également une bonne connaissance de la morphologie des fonds, de la circulation des eaux et de l'hydrologie en baie de Seine. En outre, les modélisations développées dans le cadre de COLMATAGE (Thouvenin et *al.*, 1999) permettent aujourd'hui d'aider à la compréhension du fonctionnement de cet écosystème complexe, *via* l'étude des phénomènes et de leur variabilité à différentes échelles spatiales et temporelles (Figure 10).

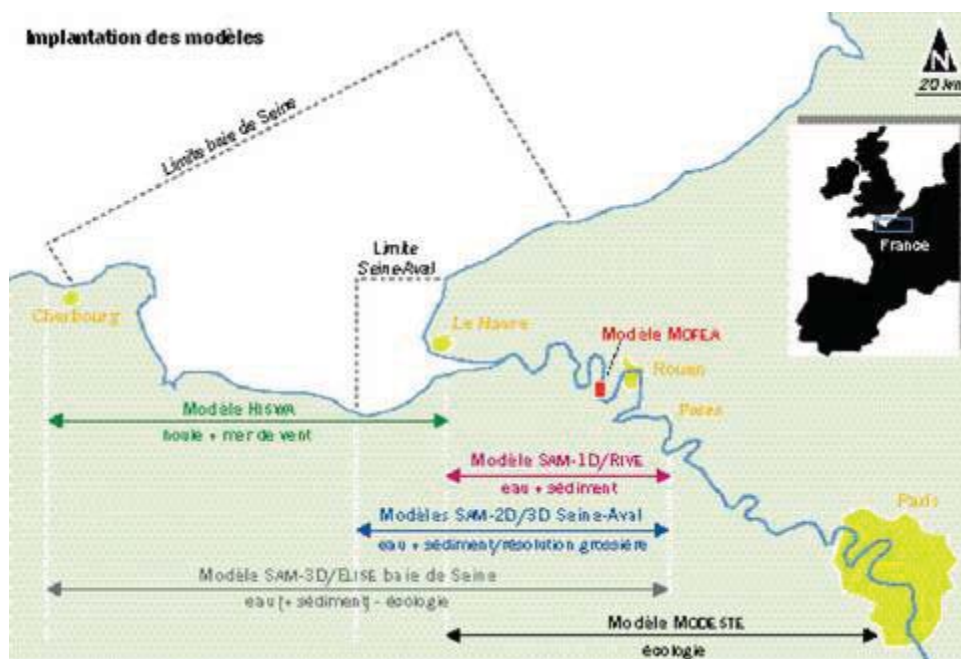


Figure 10 : Emprise spatiale des différents modèles développés dans le programme Seine-Aval.

## A. LE SYSTEME "MANCHE – BAIE DE SEINE"

### 1. Hydrodynamisme et hydrologie

La Manche est qualifiée de mer mégatidale, les actions hydrodynamiques y sont intenses et dues principalement à l'intensité des courants de marées, eux même dépendants de la morphologie générale des fonds et de la côte. Ils s'orientent majoritairement vers le nord-est, en période de flot, et vers le sud-ouest après la "renverse des courants", en période de jusant. Mais le bilan entre ces deux mouvements contraires est en faveur d'un lent mouvement de la masse d'eau vers le nord-est. S'il existe des courants induits par les houles de tempête et les vents, au niveau des plus faibles profondeurs, les courants de marée restent dominants à cette échelle (Reynaud *et al.*, 2003). Les modélisations de courants résiduels en Manche effectuées par Salomon & Breton (1991) montrent ainsi l'existence d'un fleuve central ("rivière Manche"), qui correspond à une onde de marée progressive venant de l'Atlantique. L'intensité des courants

diminue graduellement du large vers les côtes, où les profondeurs sont plus faibles, et peut se renforcer par le resserrement des côtes anglaises et françaises comme au niveau du détroit du Pas-de-Calais. La géomorphologie de la côte modifie la dérive générale des courants de marée vers le nord-est, si bien qu'à l'est des caps se forment des zones de tourbillons latéraux. C'est notamment le cas au niveau de la pointe du Cotentin, à Barfleur, qui se dresse transversalement à la progression des ondes de courant dominantes (Figure 11).

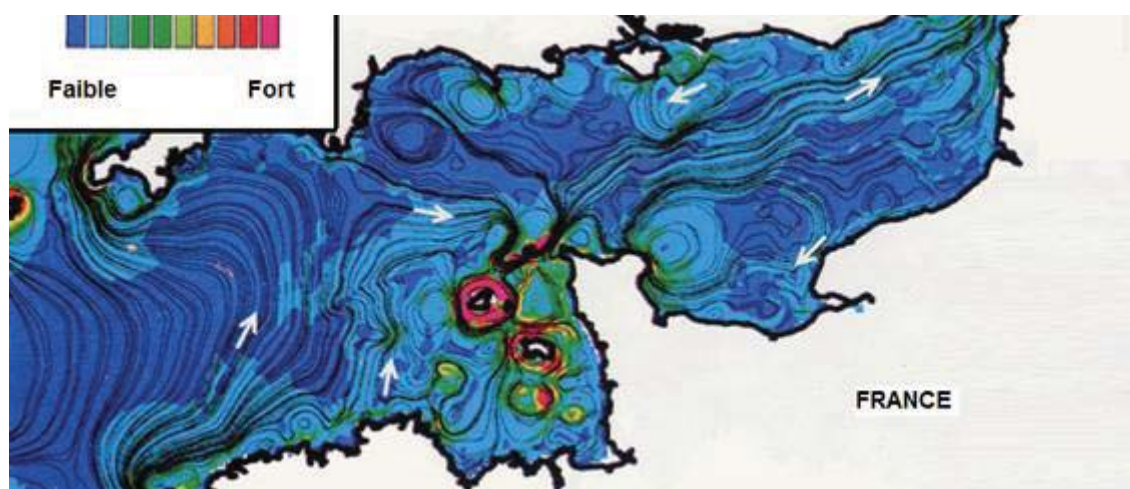


Figure 11 : Carte des courants résiduels en Manche (d'après Salomon et Breton, 1991)

En raison de l'éloignement des côtes anglaises et françaises après le Cotentin, on observe un ralentissement de la vitesse des courants de marée de la Manche Centrale vers les extrémités de la baie de Seine (Larsonneur, 1971 ; Salomon et Breton, 1991). Au sein de cette baie, les vitesses des courants de marée sont ainsi les plus fortes au nord-ouest vers le détroit du Cotentin et au nord du pays de Caux (plus de 3 nœuds en surface lors des vives-eaux moyennes), elles sont comprises entre 1 et 2 nœuds dans la partie méridionale de la baie, puis diminuent graduellement d'intensité vers la baie des Veys et vers la baie de Seine Orientale.

D'après Le Hir et *al.* (1985), les mouvements des masses d'eaux en baie de Seine sont dus à trois principaux forçages que sont la marée, le vent et les apports d'eau douce. Mais d'une façon générale, le mouvement des eaux correspond au mouvement général de circulation résiduelle des eaux en Manche (Salomon, 1985), et les forçages, que sont le vent, la houle et les apports d'eaux douces, s'expriment à une échelle plus petite près des côtes sur les plus faibles profondeurs. Ainsi, la trajectoire ouest-est définie par le courant dominant de flot est encore présente au centre et au large de la baie, puis est redirigée vers le nord en baie de Seine Orientale (Figure 12). A l'abord des côtes, elle tend à devenir elliptique et forme des tourbillons anticycloniques comme au large de Barfleur et du cap d'Antifer. On distingue également des

tourbillons secondaires qui sont induits par la diminution des profondeurs, comme le long des côtes du Calvados. Des directions nord-sud dominant le long du littoral Cauchois et de la côte Est du Cotentin, un courant moyen côtier est même dirigé vers l'Ouest le long des côtes du Calvados.

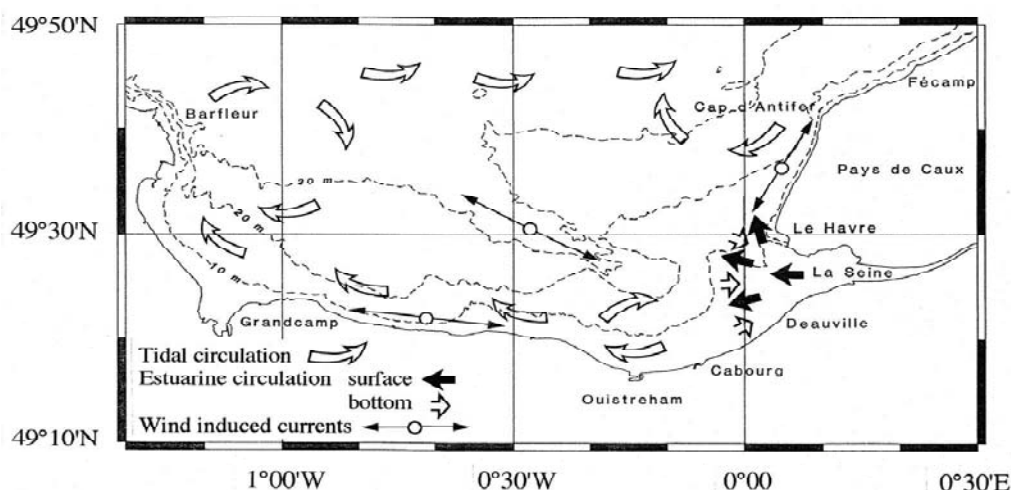


Figure 12 : Schéma de circulation résiduelle en baie de Seine modifié de Le Hir et al. (1985)

L'examen approfondi du mouvement des masses d'eau à différents moments de la marée, d'après des données de terrain du SHOM (Larsonneur, 1971), a permis de mettre en évidence la variabilité spatiale et temporelle de la direction des courants de marée (Figure 13). Cette variabilité se montrait alors plus forte près des côtes, au niveau de la baie des Veys et de la baie de Seine Orientale, qu'au large. La description de la circulation des masses d'eau présentée ici reprend celle décrite dans cet ouvrage. Quand le flot s'établit (environ 5 h avant la PM), un courant naissant longe les côtes du Calvados. Cependant, l'estuaire qui achève encore de se vider amène à un mouvement d'eau de sens contraire au Courant du Calvados, des girations se produisent aux abords de l'embouchure. Quand le flot est bien établi une heure plus tard, il s'incurve vers le sud créant une zone de divergence au niveau d'Antifer et un courant nord-sud le long du pays de Caux. C'est le courant d'Antifer qui prolonge l'effet du jusant. La zone de divergence, où les eaux rejoignent soit la Manche soit l'estuaire, se dirige vers l'estuaire à marée montante, puis une heure avant la PM, les courants venus de l'ouest s'incurvent vers le nord donnant le courant de Verhaule qui se maintient jusqu'à la renverse. Le jusant s'établit une heure environ après la PM, les eaux sont redirigées vers l'ouest et l'estuaire se vide. Il se produit un courant tournant entre Antifer et la Hève, en raison de la rencontre des masses d'eaux provenant de la Manche, qui affronte obliquement le courant de flot remontant du sud.



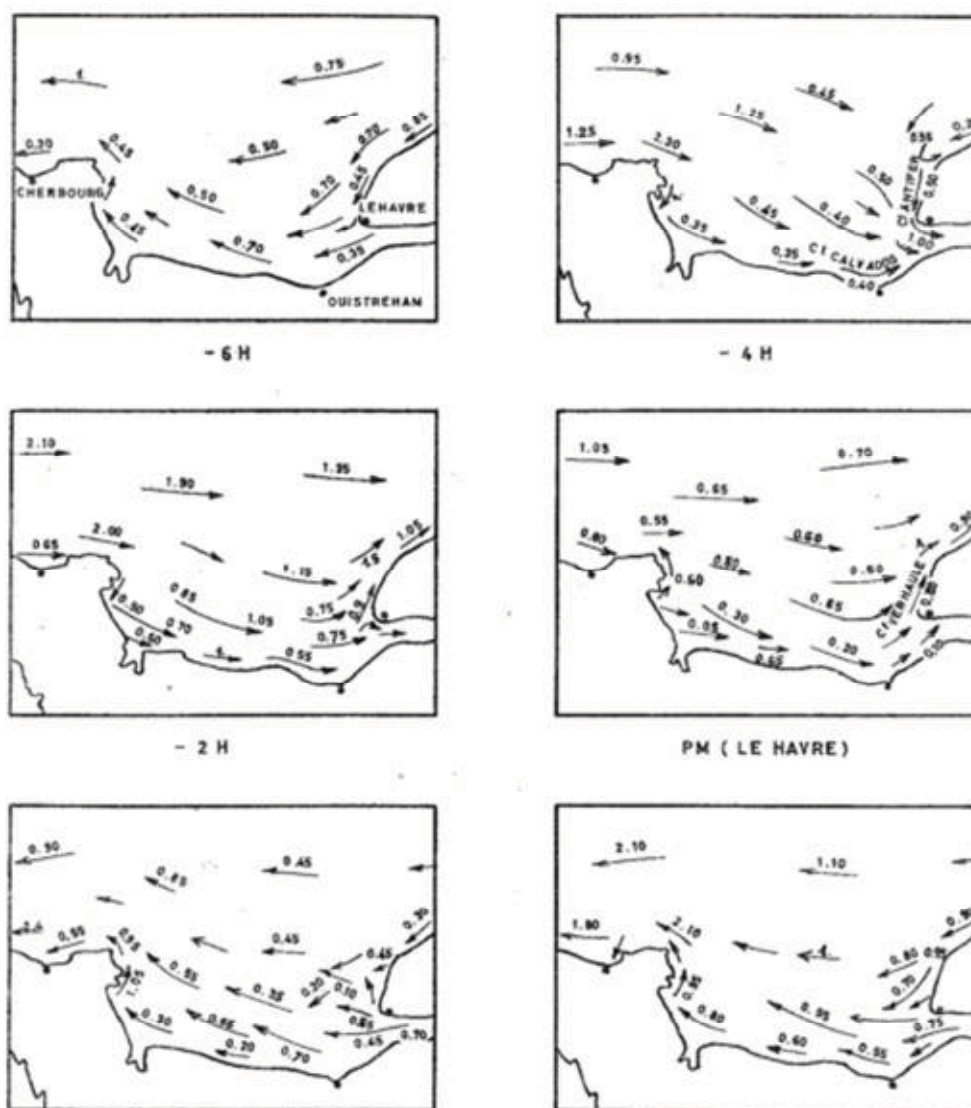


Figure 13 : Courants de surface d'après le SHOM, par rapport à la pleine mer au Havre, vitesses en m/s en vive-eau. Source : Larssonneur (1971).

Il est à noter que cette étude est relativement ancienne et que si les données de courantologie peuvent être encore valables dans la majeure partie de la baie, elles peuvent être modifiées aujourd'hui aux abords de l'estuaire de la Seine, en raison notamment des nombreux aménagements entrepris. La morphologie de cette zone côtière a en effet fortement évoluée jusqu'à aujourd'hui.

La marée est qualifiée de macrotidale voire d'hypertidale (Allen, 1993), et comme évoqué précédemment, l'onde de marée progressive venue de l'Atlantique est perturbée en baie de Seine en raison de la géométrie côtière et de la morphologie sous-marine. Ainsi, les marées au Havre se caractérisent par une période de flot plus courte (5 h) que celle de jusant (7h30) et par un étal de pleine mer appelée "tenue de plein" d'environ 3 h, du à l'oscillation transversale du bassin



côtier allant de la baie de Seine aux côtes anglaises (Chabert d'Hières & Le Provost, 1978 ; Le Provost *et al.*, 1986).

## 2. Température et salinité

D'après les cartes de salinités et de températures moyennes de surface publiées par Lumby (1935), la température décroît en hiver d'ouest en est et du large vers la côte. Cette tendance s'inverse en été (Figure 14). Les amplitudes thermiques augmentent vers l'est au fur et à mesure que l'on progresse dans ce bras de mer et ainsi que vers les côtes, ceci en relation avec la diminution des profondeurs. Les salinités de surface sont sensiblement plus fortes à la sortie de l'hiver qu'à la fin de l'été et diminuent d'ouest en est et du large vers les côtes. Les conditions de fond peuvent être assimilées à celles de surface, notamment en Manche Orientale, en Manche Centrale et dans le golfe normano-breton, où l'hydrodynamisme soutenu empêche la stratification des eaux. Ainsi on distingue les eaux océaniques relativement sténothermes à l'ouest et les eaux marines de plus en plus continentales et eurythermes vers l'est.

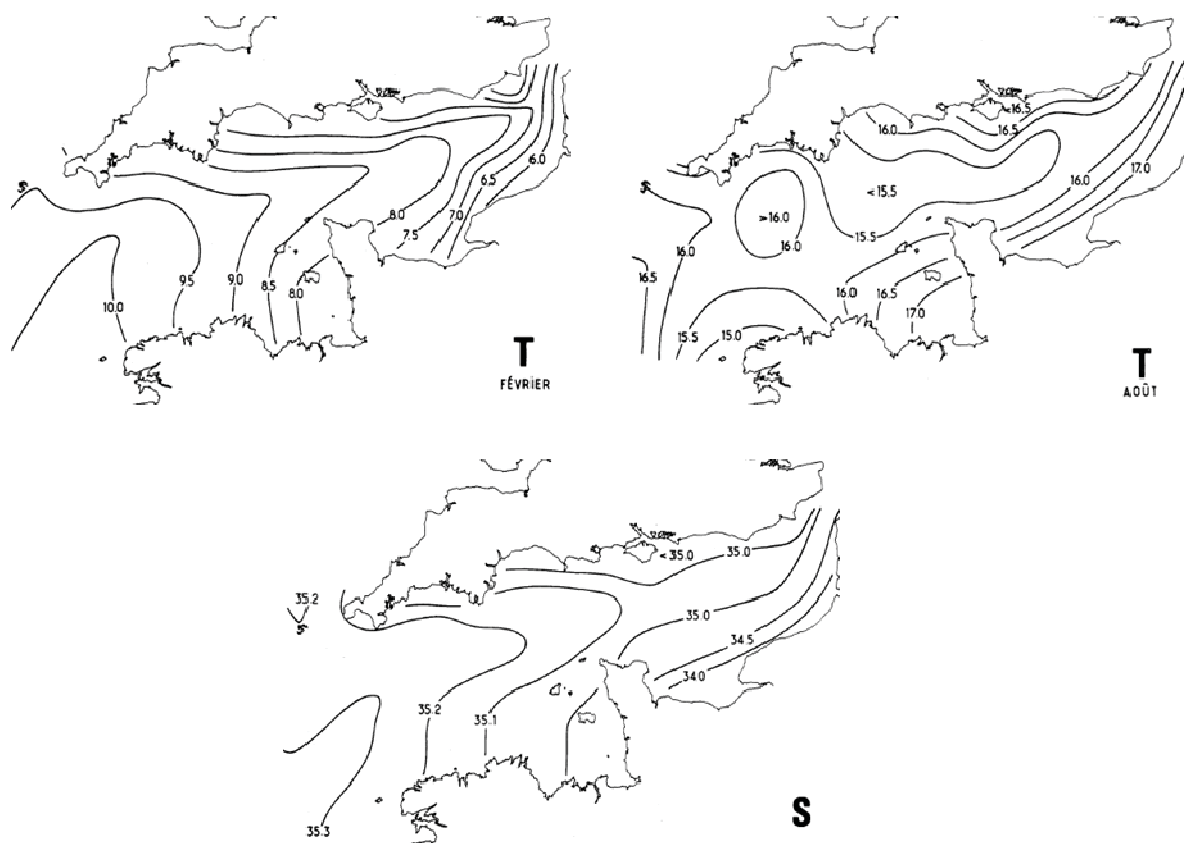


Figure 14 : Distribution des températures moyennes mensuelles de surface en février (T FÉVRIER), en Août (T AOÛT) et des salinités moyennes annuelles de surface (S) dans la Manche (d'après Lumby, 1935 and Belsher *et al.*, 1976).

L'influence de la Seine se fait sentir à l'échelle de la baie jusqu'en Manche Centrale et le long des côtes de la Manche. La Figure 15, reprise de la thèse de Cugier (1999), représente les moyennes mensuelles des températures de surface en Manche obtenue par satellite entre avril et juillet 1998. Elle montre bien un réchauffement général des eaux avec des températures avoisinant les 10 °C en avril et 17-18 °C en juillet, en relation avec l'influence de la Seine. Les températures à la côte sont plus faibles qu'au large en situation hivernale alors que la tendance s'inverse en période estivale.

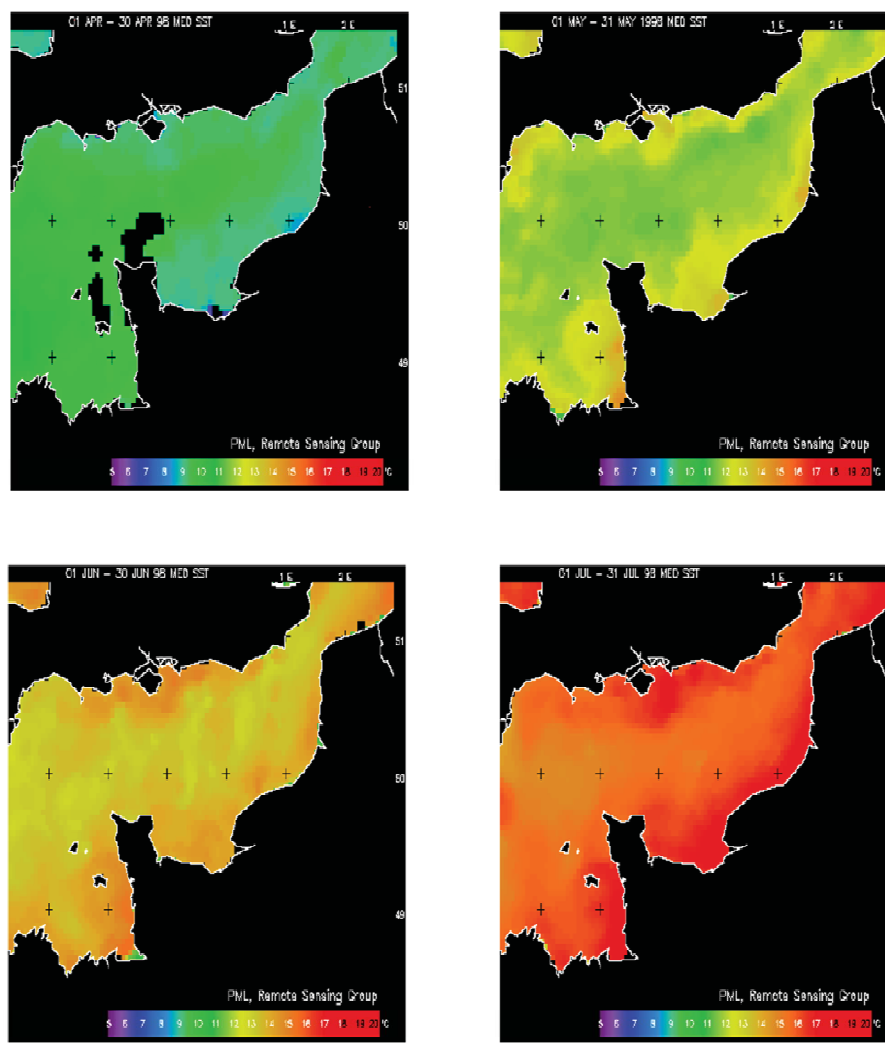


Figure 15 : Evolution des moyennes mensuelles de températures de surface en Manche entre avril et juillet 1998, d'après le Remote Sensing Data Analysis Service (RSDAS), Plymouth. Source : Cugier (1999).

Le recensement des mesures hydrologiques en baie de Seine entre 1978 et 1994, issues des campagnes du CNEXO et du PNOG (Aminot et *al.*, 1997), montre qu'en baie de Seine, la température des eaux varie selon les années entre 6 à 8 °C en hiver et entre 15 à 18 °C en été (Aminot et *al.*, 1997). La différence de température entre la surface et le fond est faible, environ

0,5 °C de l'automne au début du printemps et jusqu'à 1 à 3 °C le restant de l'année. Le maximum s'observe toujours dans la partie sud-est de la baie, là où les profondeurs sont plus faibles et où l'influence des eaux de la Seine se fait largement sentir.

## **B. LE SYSTEME "BAIE DE SEINE ORIENTALE – EMBOUCHURE"**

### **1. Hydrodynamisme et hydrologie**

Comme évoqué précédemment, le tracé de la côte apporte de fortes perturbations de la circulation des eaux en baie de Seine, modifiant les mouvements généraux de la marée en Manche centrale et de façon plus marquée à l'abord des côtes (Figure 12).

A cette échelle, le mouvement des masses d'eau n'est donc plus majoritairement contrôlé par les phénomènes de marée. Ce sont à la fois les phénomènes de marée, la géométrie de la zone côtière, la bathymétrie et le débit de la Seine au droit du débouché en mer qui gouvernent la circulation des masses d'eau (Le Hir et *al.*, 1985, 2001). D'autres forçages agissent significativement sur la circulation des eaux, comme la houle et le vent dans les faibles profondeurs et la morphologie particulièrement anthropisée de l'estuaire. Il en résulte des conditions spatio-temporelles variées et contrastées en baie de Seine Orientale, secteur sous forte influence estuarienne.

#### ***a. L'intensité des courants de marée***

La caractérisation du système présentée ici est basée sur les résultats de modélisation présentés dans Le Hir et *al.* (2001). La simulation par le modèle SAM-3D de la distribution des courants maximums de marée en surface au cours d'une marée de vive-eau (Figure 16) montre que les plus fortes vitesses atteintes au flot (entre 1,5 m / s à plus de 2,5 m / s) se localisent d'une part au large, ce qui est dû au courant de Verhaule (circulation résiduelle intense de flot vers le nord-est), puis d'autre part dans l'embouchure entre les digues submersibles ainsi qu'au nord et au sud de celles-ci. En effet, les vitesses des masses d'eau peuvent augmenter localement avec un rétrécissement de la section d'écoulement (par remontée du fond ou par réduction de largeur), ce qui est le cas des Fosses Nord et Sud (aussi appelées "Fosses de flot") puis du chenal de navigation. Les plus fortes vitesses atteintes au jusant (jusqu'à plus de 2,5 m / s) concernent les zones de l'engainement et du Cap de la Hève. En face de l'embouchure et au sud du secteur, les vitesses maximales qui sont atteintes au flot sont intermédiaires (jusqu'à 1,5 m / s). Cette configuration témoigne de conditions hydrodynamiques qui sont définies à la fois par les mouvements induits à l'échelle du système "Manche – baie de Seine" et par les mouvements induits par la morphologie particulièrement anthropisée de l'estuaire de Seine.

Nous pouvons souligner ici l'absence de prise en compte des travaux de Port 2000 qui doivent avoir aujourd'hui une influence sur ces vitesses modélisées, notamment en ce qui concerne le secteur au nord du chenal de navigation en Fosse Nord et dans les fonds subtidiaux proches.

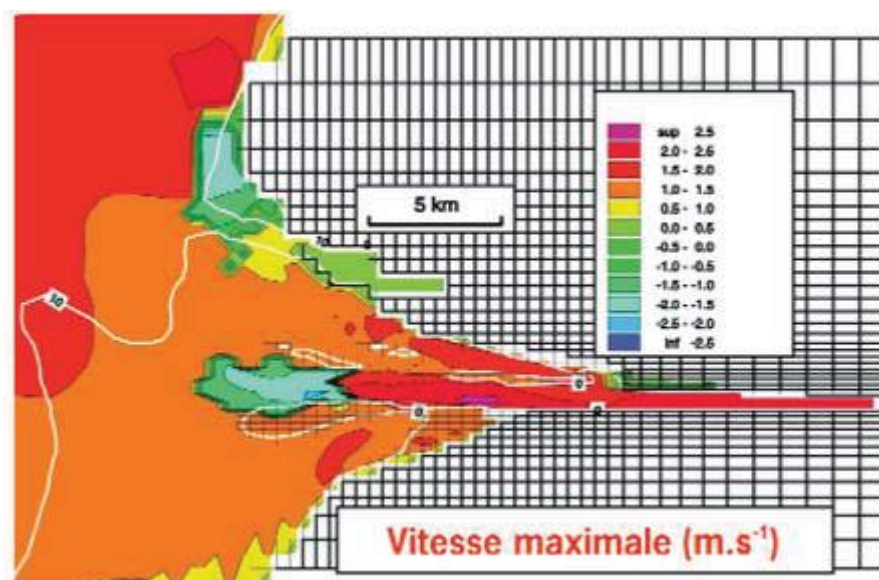


Figure 16 : Distribution des courants maximums de surface au cours d'une marée de vive-eau (coefficient 110). Les valeurs sont négatives lorsque le maximum est obtenu en jusant et positives lorsque le maximum est obtenu au flot (Le Hir et al. ,2001).

### **b. Le vent et la houle**

Le vent peut induire une augmentation des vitesses de circulation résiduelle essentiellement par faible profondeur comme le long des côtes des Pays de Caux et du Calvados. La houle du large qui se déforme à l'abord des côtes génère des vagues qui peuvent, pour des profondeurs inférieures à la hauteur des vagues, avoir le rôle d'engendrer des courants de dérive littorale ou encore de générer des contraintes sur le fond. Les vagues peuvent donc provenir de la houle générée au large mais aussi par le vent, localement, entraînant une "mer de vent". Souvent, les deux types sont combinés. Pour donner un exemple de contraintes sur le fond engendrées par les vagues, des vitesses orbitales près du fond ont été modélisées dans le cas d'une houle d'ouest combiné avec un vent d'ouest force 4, cas particulier parmi les conditions d'agitation les plus probables (Figure 17). On constate que les contraintes sont favorisées par les très faibles profondeurs, au niveau des bancs de sables séparant les chenaux de l'embouchure : bancs d'Amfard, du Ratier et Gambe d'Amfard.

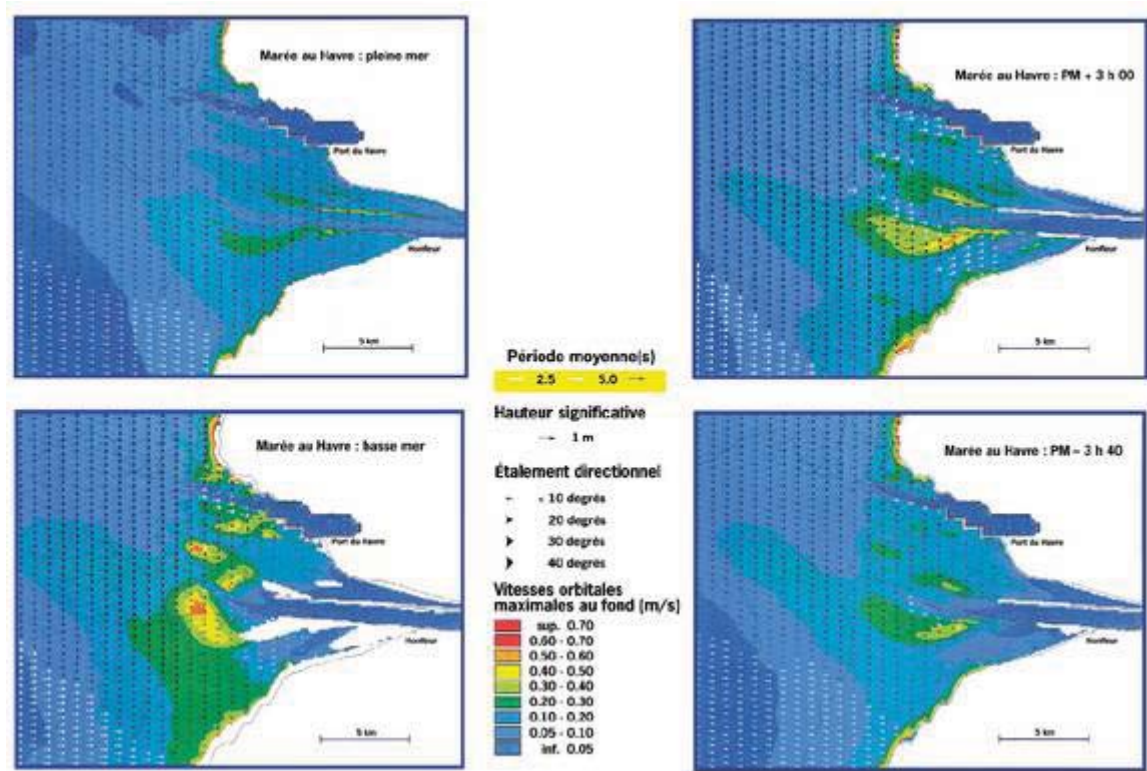


Figure 17 : Calcul des agitations à l'embouchure de la Seine. Représentation des vitesses orbitales près du fond à différents moments de la marée (vive-eau). Les flèches représentent le courant de marée. Le Hir et al., 2001.

### c. Gradient de densité

A cette échelle, il est difficile de scinder l'hydrologie et l'hydrodynamisme caractérisé par la résiduelle de marée. En effet, la dessalure des eaux à proximité de l'exutoire de la Seine peut provoquer une stratification de la colonne d'eau lorsque les courants de marée et l'agitation par les vagues ne sont plus suffisants pour mélanger toute la colonne d'eau, influençant ainsi l'hydrodynamisme. En raison de la rencontre des masses d'eau douce du fleuve et des masses d'eau salées marines plus denses, une circulation dite "estuarienne" se met en place. Les eaux salées remontent l'estuaire près du fond et les eaux douces s'écoulent vers le large en surface. Les courants résiduels dus à la marée sont modifiés par cette rencontre de masses d'eau et on note dans le secteur un écart significatif entre les conditions de surface et de fond, aussi bien pour les distributions de salinité que pour les distributions des courants résiduels qui intègrent ici à la fois les effets de la marée et de densité (Figure 18). Le panache de surface est décentré vers le nord alors qu'au fond, il se distribue préférentiellement le long des côtes du Calvados. Ce schéma est probablement dû à l'asymétrie nord-sud de la bathymétrie en baie de Seine Orientale. Les faibles profondeurs empêcheraient l'expression des gradients verticaux de salinité. Il est remarqué qu'en période de crue, les gradients de densité sont plus marqués et l'intrusion marine est accentuée au



fond. Les courants résiduels montrent quant à eux une circulation inversée vers le large en surface et vers l'amont au fond, cette dernière étant à relier à la résultante de flot. Nous pouvons également remarquer, si l'on s'intéresse plus précisément au courant résiduel, qu'il existe de part et d'autre du débouché en mer des zones où leur intensité est réduite, ce qui va de pair avec un temps de résidence des eaux plus importants. (Le Hir et *al.*, 2001).

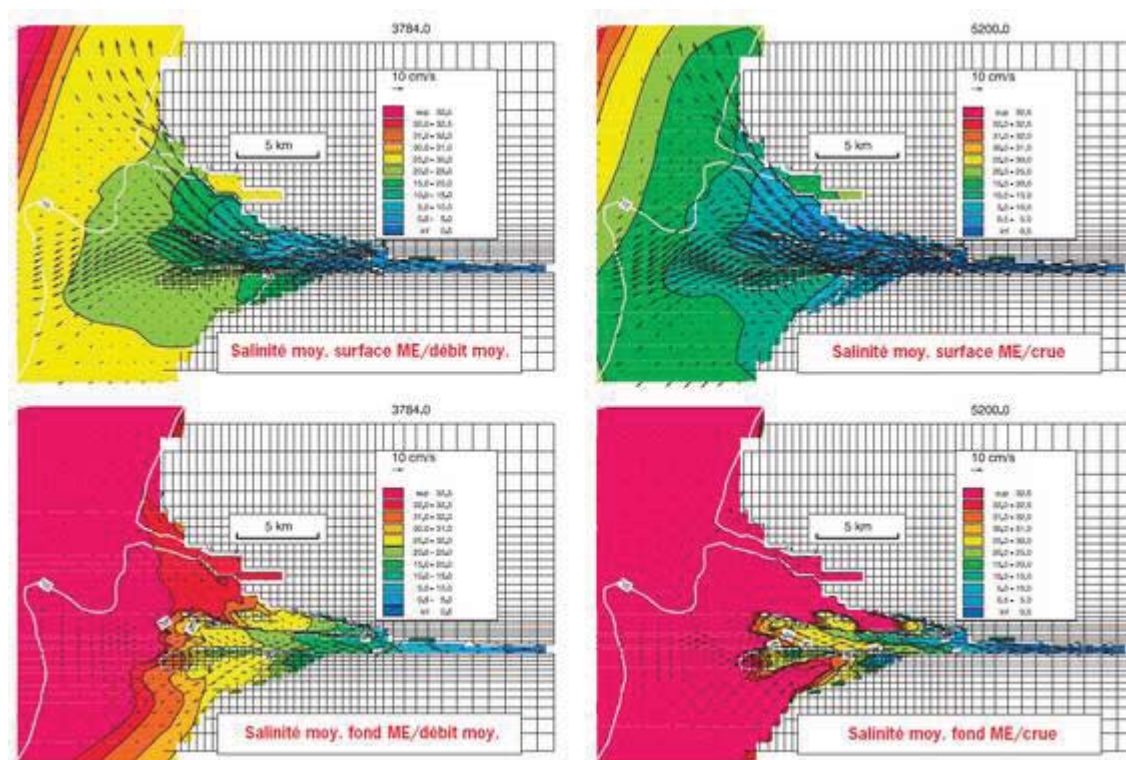


Figure 18 : Distribution des salinités moyennes dans l'estuaire de la Seine, en surface et au fond, au cours d'une marée de morte-eau. Simulation avec le modèle SAM-3D. Les flèches représentent le courant résiduel. Source : Fascicule Seine-Aval " Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau "). Le Hir et *al.* (2001).

## 2. Température et salinité

Les modélisations récentes des salinités et des températures de surface et de fond (Cugier, 1999) sur une station située au droit du débouché en mer semblent fiables (Figure 19). Elles montrent une plus forte variation des conditions de salinité entre la surface et le fond, à relier au gradient de densité occasionné dans ce secteur sous influence de la Seine. Ces résultats sont en accord avec les résultats présentés dans Le Hir et *al.* (2001). Les salinités sont plus faibles et plus variables en surface qu'au fond, notamment en période de régime de crue (débits de crue de la Seine compris entre 800 et 1400 m<sup>3</sup> / s avant le jour 180, puis entre 200 et 300 m<sup>3</sup> / s après ce jour en période d'étiage).

En ce qui concerne les températures, elles représentent bien un cycle annuel, qui est d'ailleurs très semblable entre la surface et le fond. La faible profondeur du point de mesure (inférieure à 10 m), en liaison avec l'hydrodynamisme, empêcherait l'établissement d'un gradient vertical de température. La partie orientale de la baie de Seine peut donc être caractérisée par une stratification haline de ses eaux.

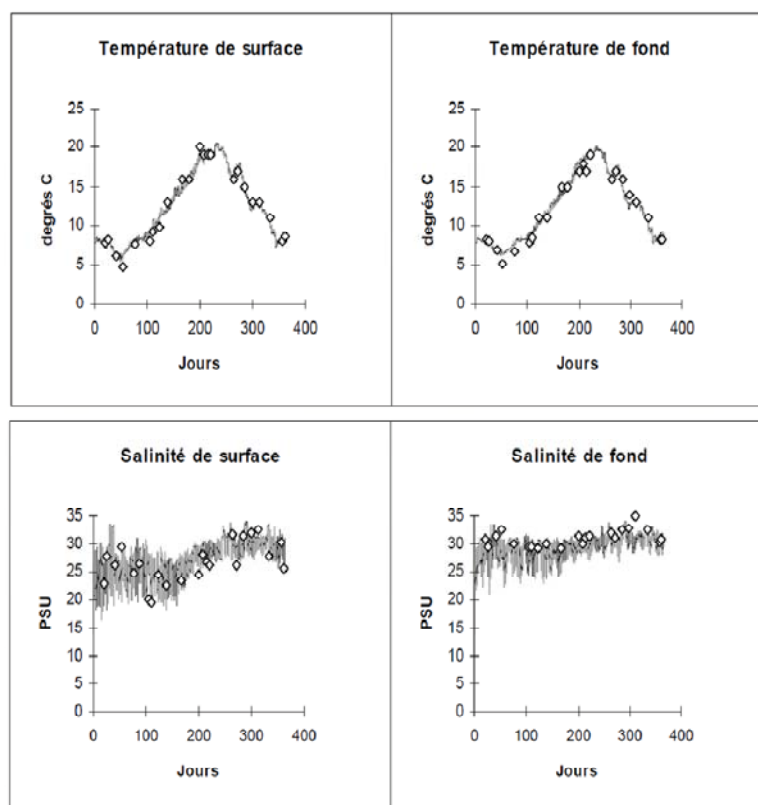


Figure 19 : Comparaison entre température simulée (trait) et température mesurée (points) (haut) et comparaison entre salinité simulée (trait) et salinité mesurée (points) (bas) à l'embouchure pour l'année 1983 (Cugier, 1999).

Le recensement des mesures hydrologiques en baie de Seine entre 1978 et 1994 issues des campagnes du CNEXO et du PNOC (Aminot et *al.*, 1997) montre que la stratification des eaux s'opère préférentiellement à proximité de l'exutoire de la Seine, le long des côtes du Calvados et directement à l'ouest de l'embouchure. Elle est donc plus prononcée au niveau des faibles profondeurs ( $< 10$  m). Une comparaison de la situation en mai 1978 et en mars 1979 (Figure 20) montre que ce phénomène est également fonction des débits de la Seine. Si ce phénomène est accentué en raison des forts débits observés en mars 1979, il semble cependant peu influencé par la marée au regard de la comparaison entre les situations de basse mer et de pleine mer en mai 1978.

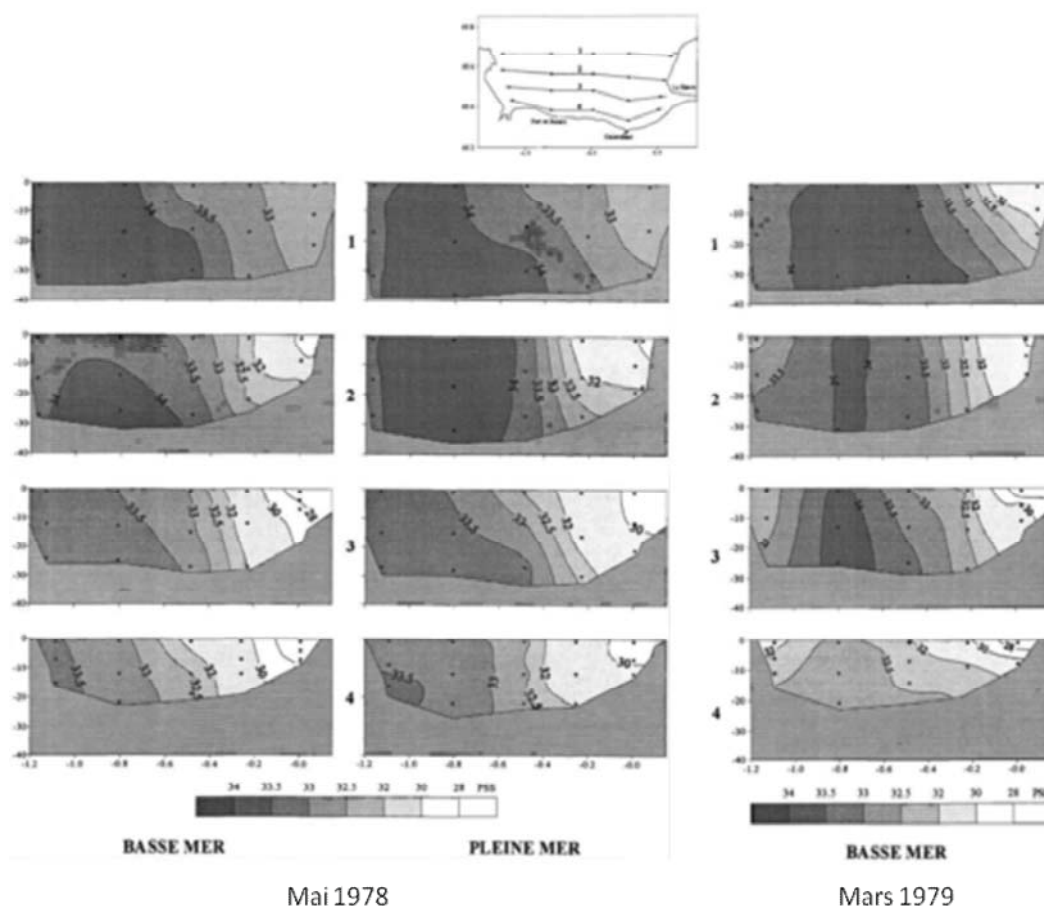


Figure 20 : Coupes verticales de salinité à basse mer et à pleine mer en mai 1978 et à basse mer en mars 1979. (Aminot et al., 1997).

Les cartes de répartition des températures dans Aminot et al. (1997) montrent qu'en baie de Seine Orientale, elles varient de 10 à 18 °C du début du printemps au début de l'automne, et de 6 à 8 °C le restant de l'année en période hivernale. La masse d'eau est relativement homogène dans le secteur et les températures diffèrent peu entre le fond et la surface. Les mesures effectuées montrent des écarts de température variant entre 1 °C et 3 °C localisés dans le sud-est du début du printemps au début de l'automne et n'excèdent pas 0,5 °C le restant de l'année.

### III. GRADIENTS ET DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE

#### A. LE SYSTEME "MANCHE – BAIE DE SEINE"

##### 1. Gradients et faciès sédimentaires

A cette échelle, la répartition des sédiments reflète l'intensité des courants de marée. Ainsi, aux gradients d'intensité hydrodynamique sont associés un granoclassement des sédiments aboutissant à des faciès sédimentaires relativement distincts (Figure 21). Les travaux de Vaslet et al. (1978) et de Larssonneur et al. (1982) décrivent de grands ensembles caillouteux et graveleux



dans les zones de plus forte énergie en Manche centrale et au niveau du Cap Gris-Nez, où le resserrement des côtes anglaises et françaises a pour effet d'intensifier les courants de marée, mais aussi au large du pays de Caux du fait de la réflexion de l'onde de marée en provenance de l'ouest. L'affaiblissement de ces courants, à quelques mètres de profondeur aux abords des côtes, permet l'installation de grandes formations sableuses, notamment au sud du détroit du Pas-de-Calais, dans les baies et estuaires mais aussi à la sortie du détroit au sud de la Mer du Nord où les côtes françaises et anglaises s'éloignent. Les dépôts les plus fins se localisent principalement dans les estuaires et sur une bande côtière à quelques mètres de profondeur (Larsonneur, 1971 ; Vaslet *et al.*, 1978 ; Avoine, 1981 ; Avoine *et al.*, 1984 ; Avoine & Larsonneur, 1987). Il en résulte un double gradient ouest-est et côte-large dans la répartition des sédiments en Manche. Ainsi, dans toute étude ayant trait de près ou de loin à la composante sédimentaire, l'hydrodynamisme est un facteur de structuration et d'organisation essentiel à prendre en compte.

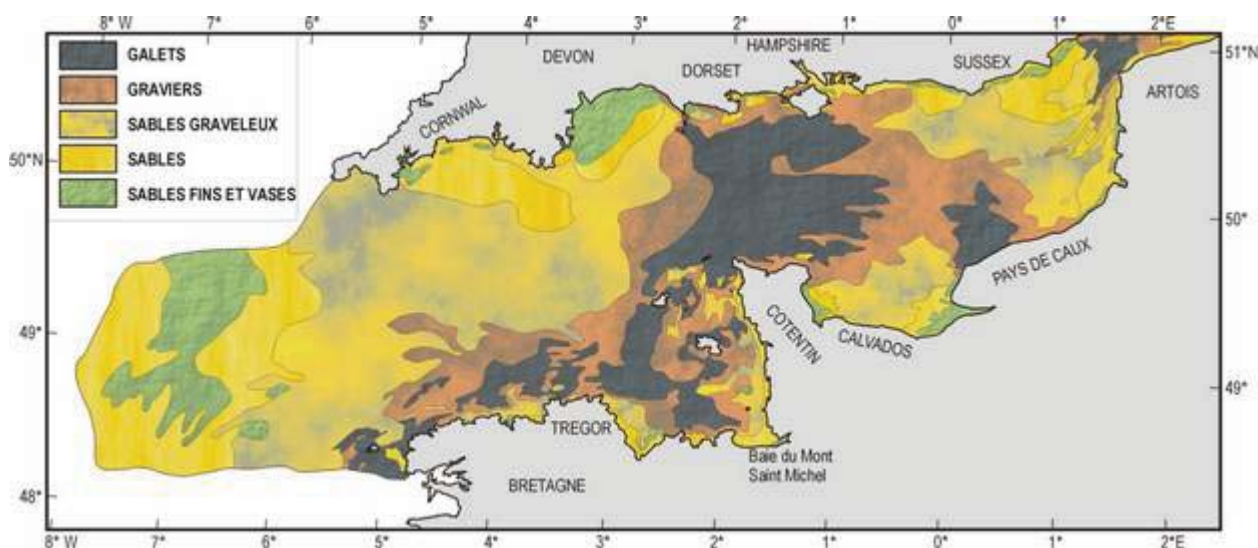


Figure 21 : Schéma de la distribution des sédiments superficiels en Manche (Vaslet *et al.*, 1978).

Un zoom sur la baie de Seine, extrait de la carte des sédiments superficiels dressée par Vaslet *et al.* (1978), montre une répartition sédimentaire selon un gradient grano-décroissant du large vers la côte en relation étroite avec la réduction d'intensité des courants de marée, favorisée par une diminution de la profondeur (Figure 22). Ainsi, les sédiments sablo-graveleux ou graveleux sont largement distribués dans la partie externe ouverte sur la mer et dans la partie méridionale de la baie, et les sédiments sableux ou sablo-vaseux sont cantonnés aux niveaux des baies peu profondes que sont la baie des Veys et la baie de Seine Orientale. Si les vents, la houle et les apports d'eau douce peuvent conférer aux masses d'eau des mouvements particuliers, à l'échelle de la baie de Seine la circulation résiduelle est largement influencée par les courants de marée et

la géomorphologie. L'intensité des courants de marée est le principal facteur responsable de la répartition des sédiments, à l'image de la situation à l'échelle de la Manche.

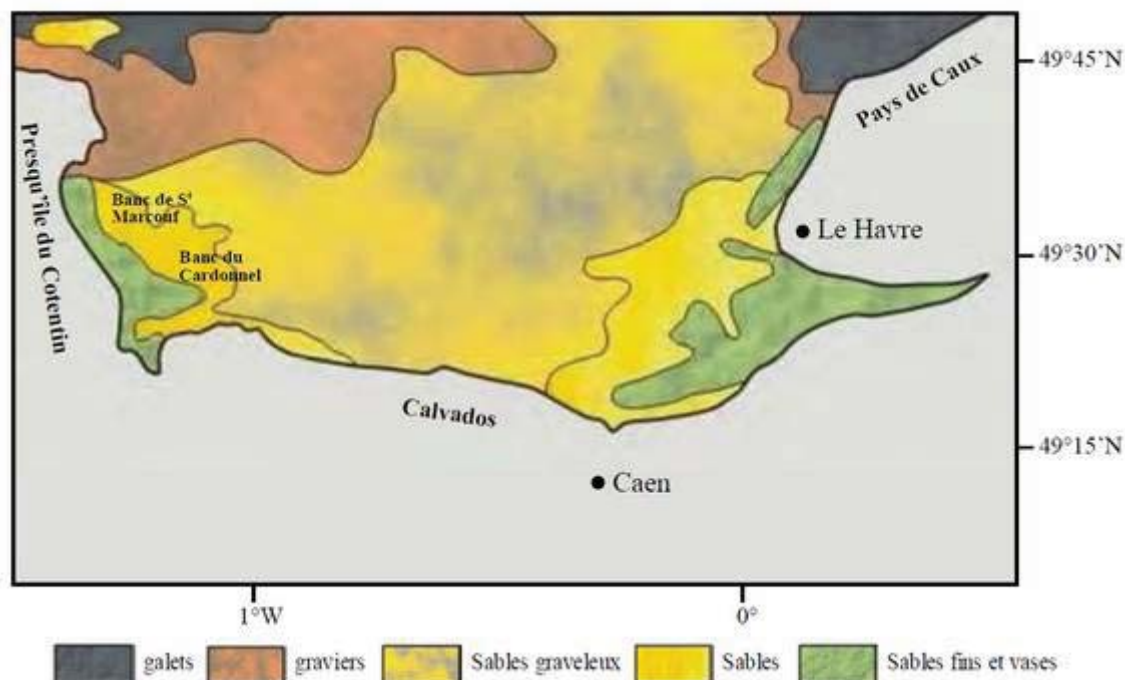


Figure 22 : Carte de répartition des sédiments superficiels en baie de Seine. Extrait de Vaslet et al., 1978 dans Janson (2007).

## 2. Evolution à long terme et dynamique saisonnière

### a. Evolution à long terme en Manche orientale

L'évolution à long terme des sédiments en Manche a été abordée dans le cadre de la thèse de Foveau (2009) par une revisite de ses fonds sur la base de plus de 300 stations entre 2006 et 2007. Cette étude a permis de juger de l'évolution de ces fonds depuis les premières prospections de Holme (1961, 1966) et de Cabioch et ses collaborateurs (1971 – 1976). La Figure 23 montre la répartition sédimentaire pour les deux périodes étudiées. Foveau (2009) montre qu'à l'échelle de la Manche, il n'y a pas eu de changements sédimentaires majeurs entre ces deux périodes, et relie cette stabilité au forçage hydrodynamique qui est le facteur dominant et structurant de la couverture sédimentaire. Les changements observés concernent les zones côtières comme les baies et estuaires, mais aussi la proximité des bancs de sables notamment au sud du détroit du Pas-de-Calais. L'auteur émet néanmoins des réserves quant à ce résultat et identifie plusieurs biais possibles rendant difficile une comparaison rigoureuse. D'une part, dans le cas d'une analyse granulométrique massive des sédiments grossiers comme les cailloutis par exemple, une surestimation des éléments les plus grossiers est possible compte tenu de la méthodologie

d'échantillonnage. Les éléments les plus fins peuvent donc être sous-estimés. D'autre part, il est évoqué que des forçages saisonniers des conditions environnementales (non négligeables dans les baies et estuaires par exemple) ainsi que des événements spontanés comme les tempêtes peuvent être responsables de changements conséquents de la couverture sédimentaire. Ces changements qui s'expliquent et s'expriment à une échelle plus petite pourraient ainsi se faire ressentir à l'échelle du système "Manche" dans les analyses.

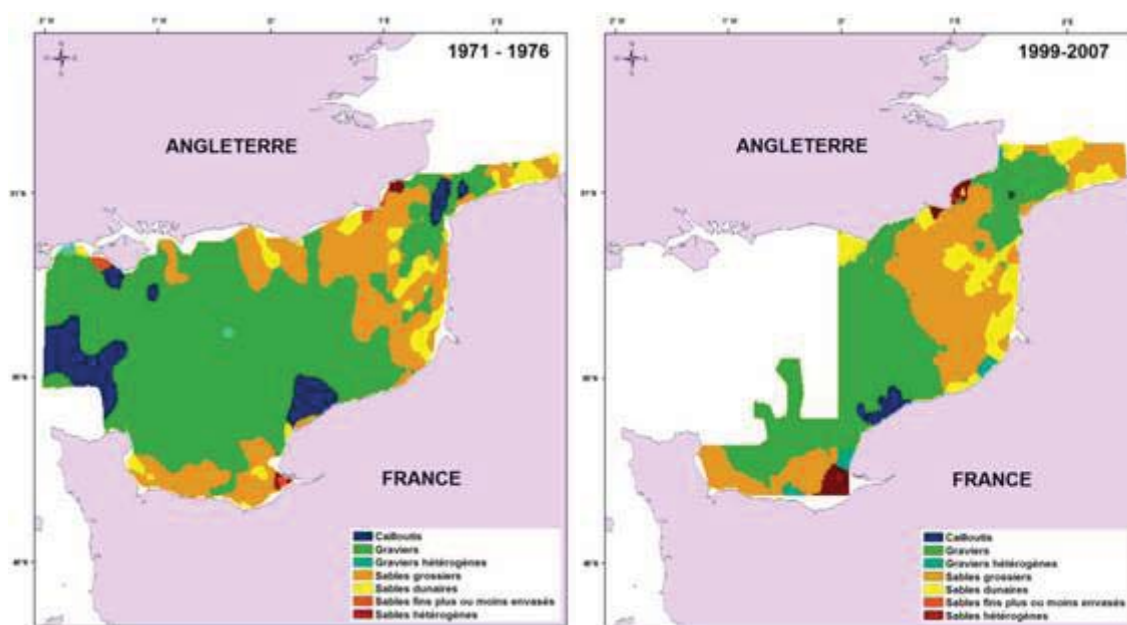


Figure 23 : Localisation des types sédimentaires selon la classification de Folk (modifiée par regroupement de types) en Manche pour la période échantillonnée entre 1971 – 1976 (gauche) et pour la période échantillonnée entre 1999 – 2007 (droite) Foveau (2009).

### ***b. Evolution à long terme et dynamique saisonnière en baie de Seine***

Peu d'études sur la dynamique spatio-temporelle de la couverture sédimentaire ont été réalisées à l'échelle de la baie de Seine. Dans Ghertsos (2002), il existe néanmoins deux images de la répartition sédimentaire, l'une correspondant à une situation en septembre 1998 et l'autre en mai 1999 (Figure 24). La comparaison de ces deux situations montre qu'en septembre 1998, la baie de Seine dans son ensemble est caractérisée par une fraction de sédiments fins (sables fins et vases) plus importante et plus étalée qu'en mai 1998. Si cela témoigne de la possible existence d'une variabilité saisonnière, seules deux dates d'échantillonnage ne peuvent permettre d'extrapoler ces résultats à une fenêtre temporelle plus large.

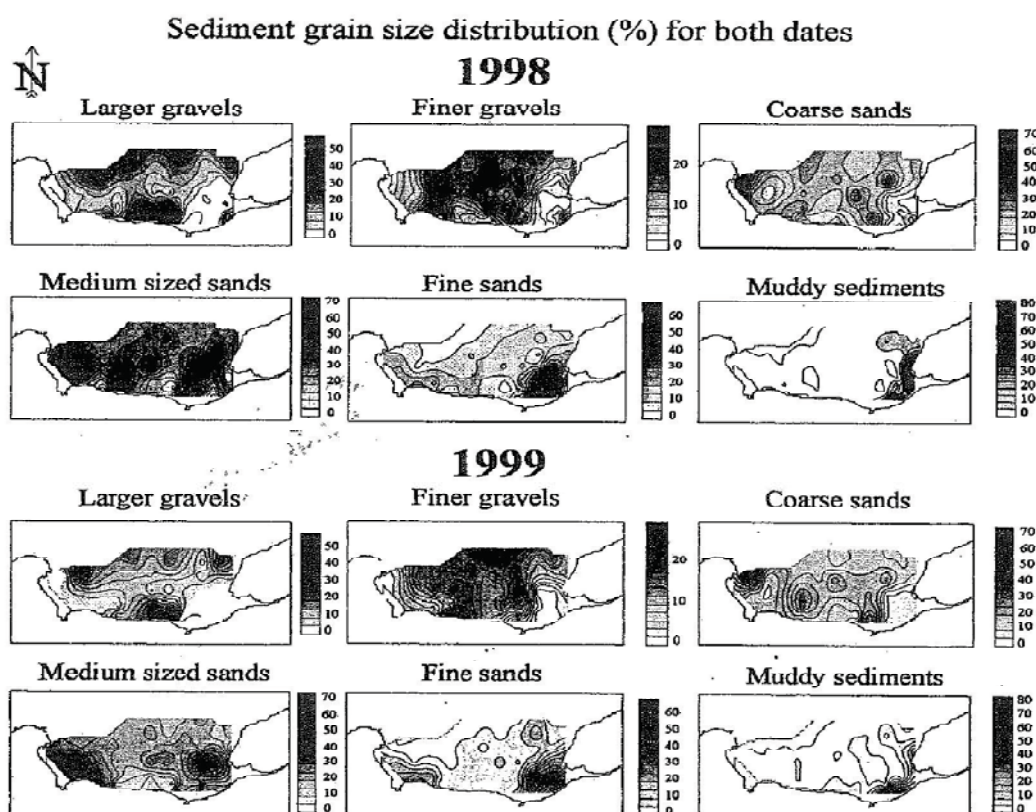


Figure 24 : Carte de la distribution des pourcentages des classes sédimentaires en septembre 1998 et en mai 1999 en baie de Seine. Vases ( $< 50 \mu\text{m}$ ), sables fins (entre 200 et 500  $\mu\text{m}$ ), sables moyens (entre 200 et 500  $\mu\text{m}$ ), sables grossiers (entre 500 et 2000  $\mu\text{m}$ ), graviers (entre 2000 et 5000  $\mu\text{m}$ ), graviers grossiers ( $> 5000 \mu\text{m}$ ). Ghertsos (2002).

Malgré cette variabilité saisonnière pressentie, une répartition similaire est généralement observée entre les deux années et en comparaison avec la situation plus ancienne (Figure 22). Les sédiments les plus fins (sables fins envasés) sont distribués en fond de baie, au niveau de la baie des Veys et de la baie de Seine Orientale, alors que les sédiments les plus grossiers sont distribués dans les plus grandes profondeurs, au centre de la baie. La configuration est donc sensiblement la même que dans les années 1970, ce qui permet de conclure qu'il n'y a pas eu de changements majeurs. Ces résultats confirment l'importance de l'intensité des courants de marée en tant que forçage principal de la structuration des sédiments du système "Manche – baie de Seine".

## B. LE SYSTEME "BAIE DE SEINE ORIENTALE – EMBOUCHURE"

### 1. Gradients et faciès sédimentaires

Les sédiments en baie de Seine Orientale sont majoritairement représentés par des sables et des vases. Les sédiments sableux sont principalement apportés par le domaine marin *via* les



courants de marée et les houles, les dépôts superficiels de vases sont en majorité d'origine fluviale (Avoine et *al.*, 1986a ; Even et *al.*, 2007 ; Lesourd, 2000 ; Dubrulle, 2007).

La carte des faciès sédimentaires du système "baie de Seine Orientale – embouchure" la plus récente (Lesourd, 2000) a été établie sur la base d'échantillons prélevés entre 1993 et 1996 (Figure 25). Elle montre à cette échelle un gradient granulométrique croissant, du fond de l'estuaire en zones abritées peu profondes vers celles au large plus profondes où l'intensité des courants de marées limite le dépôt des sédiments les plus fins.

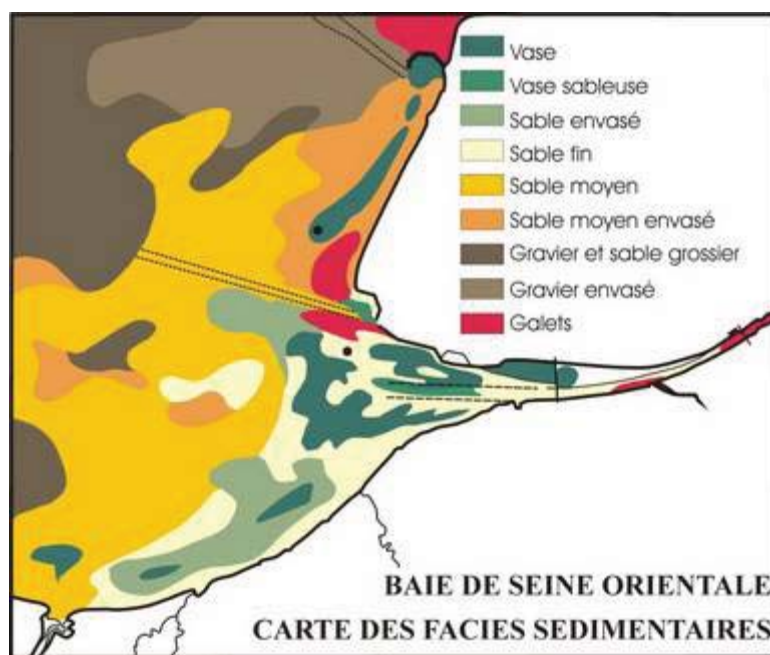


Figure 25 : Carte des faciès sédimentaires de la baie de Seine Orientale (données sédimentaires 1993-1996) (Lesourd, 2000).

Une fois de plus, la présence de ce gradient montre que l'intensité des courants de marée joue encore un rôle important dans la distribution des sédiments, à l'image de ces relations mises en évidence à l'échelle de la Manche et de la baie de Seine. On trouve ainsi du large vers la côte les sables moyens puis les sables fins et les vases. Un gradient d'affinement est plus particulièrement visible d'ouest en est au large des côtes du Calvados et du nord vers le sud le long du pays de Caux (sans considérer les dépôts de dragage d'Octeville). Cependant, au sein de l'ensemble des sables envasés, sur les fonds côtiers de moins de 10 m environ, les faciès sédimentaires sont répartis en mosaïques et le gradient d'affinement, s'il reste perceptible, n'est plus aussi tranché. L'intensité des courants de marée sur ces fonds sablo-vaseux ne semble plus prédominante et des conditions hydrodynamiques peuvent localement prendre le dessus (courants résiduels dus à la fois à la marée et à la rencontre des masses d'eau puis à la houle), engendrant une organisation sédimentaire complexe.

En dehors du stock sédimentaire situé dans l'estuaire, témoin de la présence du bouchon vaseux, les sédiments les plus vaseux sont bien représentés en baie de Seine Orientale aux niveaux des embouchures de la Seine et de l'Orne, le long des côtes du Calvados entre Ouistreham et Le Havre par des profondeurs de 5 à 10 m et au nord du dépôt de dragages d'Octeville entre Le Cap de la Hève et Antifer.

Dans les modélisations réalisées en baie de Seine Orientale tenant compte de la circulation résiduelle à la fois due à la marée et au gradient de densité (Cugier, 1999), les zones préférentielles de dépôts de fines ont été simulées (Figure 26). La simulation correspondant plus précisément aux dépôts de particules fines liés aux apports de la Seine montre une répartition similaire à celle décrite par Lesourd (2000).

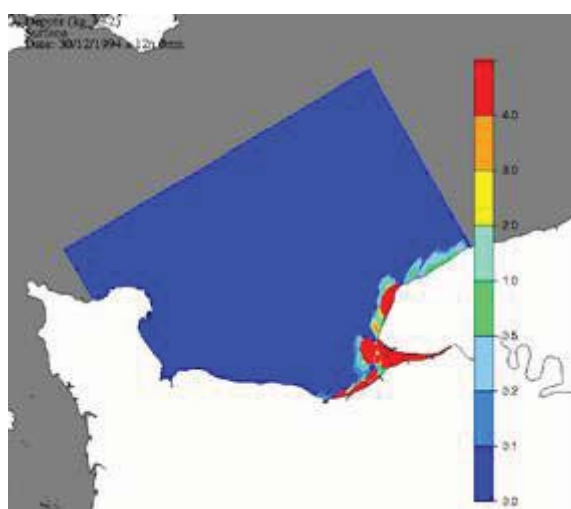


Figure 26 : Dépôts de matériaux fins simulés ( $\text{kg} / \text{m}^2$ ) au 30/12/1994, à l'issue d'une année de modélisation. Modèle hydro-sédimentaire SAM-3D/baie de Seine d'après Cugier, 1999.

Cugier (1999) montre que l'étude de la circulation résiduelle aide à comprendre la localisation de ces zones d'accumulation : (i) au niveau d'Antifer, l'existence d'un tourbillon résiduel peut favoriser la sédimentation. De plus, l'hydrodynamisme réduit en relation avec la digue du port pétrolier d'Antifer renforce les dépôts ; (ii) le long des côtes du Calvados, la circulation résiduelle d'ouest en est favorise le transport des fines dans cette direction. En outre, les tourbillons secondaires identifiés dans cette zone (Le Hir et *al.*, 1985) peuvent augmenter le temps de résidence des eaux et favoriser la sédimentation ; (iii) à l'embouchure, la circulation résiduelle inversée entre la surface et le fond, couplée à la résultante de flot, offre des conditions de piégeage du matériel particulaire.

Si Avoine et *al.* (1996) attribuait au dépôt de dragage le faciès vaseux entre le Havre et Antifer, et identifiait les faciès vaseux au large des côtes du Calvados comme provenant en

grande partie de l'érosion locale de vases fossiles, la simulation réalisée par Cugier (1999) montre que ces zones sont également des zones d'accumulation de particules fines d'origine fluviale en provenance de la Seine.

## 2. Dynamique sédimentaire

### a. Evolution à long terme de la couverture sédimentaire

#### i. Evolution à l'embouchure

Les travaux portant sur la structuration sédimentaire dans l'embouchure de la Seine et ses fonds subtidaux proches depuis le siècle dernier (Avoine, 1981 ; Avoine, 1986 ; Avoine *et al.*, 1984 ; Laignel, 1991 ; Avoine, 1994 ; Avoine *et al.*, 1996 ; Lesueur *et al.*, 1997 ; Lesueur et Lesourd, 1999 ; Lesourd, 2000 ; Lesourd *et al.*, 2001 ; Garnaud, 2003 ; Lesourd *et al.*, 2003) permettent aujourd'hui de dresser un bilan de son évolution. Si le comblement sédimentaire en milieux estuariens est reconnu actuellement comme étant une tendance naturelle, l'intervention de l'homme sur ces systèmes peut accentuer ce phénomène.

La Figure 27 résume en effet le comblement progressif des fonds grossiers dans le secteur aval de l'estuaire de Seine par les composantes sableuses et vaseuses. Cette évolution correspond à une continentalisation du milieu par progradation des dépôts (Lesourd, 2000). Les changements observés et la rapidité à laquelle ils se sont produits sont à relier aux nombreux aménagements réalisés dans l'estuaire (Avoine *et al.*, 1996 ; Lesueur *et al.*, 1997). Cette progression, à la fois naturelle et accélérée par l'anthropisation du système, s'accompagne d'un envasement associé au déplacement du bouchon vaseux vers l'aval (Lesourd, 2000).

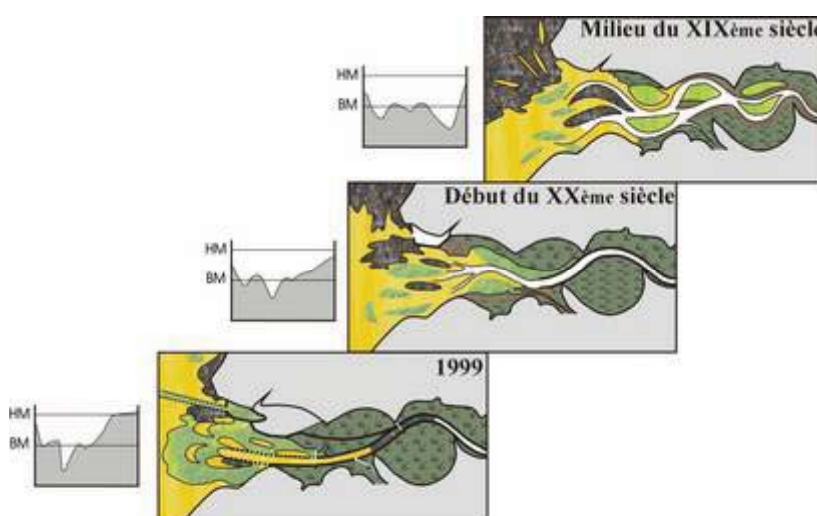


Figure 27 : Schéma de l'évolution morpho-sédimentaire historique de l'embouchure de la Seine du XIX<sup>ème</sup> siècle à 1999 (vert foncé : marais et herbiers ; vert clair : vases ; jaune : sables ; gris : cailloutis et graviers) (Lesueur et Lesourd, 1999).

L'évolution sédimentaire à l'échelle de l'embouchure et de ses fonds subtidaux proches peut être également appréhendée plus précisément par deux images de la répartition des sédiments, l'une réalisée en 1913 sur la base de près de 30 000 points de sonde (SHOM) et l'autre réalisée sur la base de 1100 échantillons prélevés à la benne Shipeck au cours de 12 missions de 1993 à 1996 (Lesourd, 2000 ; Lesourd et *al.*, 2001) (Figure 28). La situation en 1913 reflète le déplacement vers l'aval des composantes sableuses et vaseuses suite aux premiers aménagements réalisés dans l'embouchure (construction de la digue insubmersible du Nord qui borde le cours aval du chenal). A cette époque, les faciès sédimentaires dominants restent grossiers, mais ces derniers sont en phase de recouvrement par du matériel plus fin. La situation de 1993-1996 montre que, suite aux nombreux travaux de cloisonnement dans l'embouchure, les sédiments sableux s'étendent principalement vers l'aval. Mais le changement majeur est l'expansion des vases dans l'embouchure et dans les fonds subtidaux proches. D'autre part, ces dépôts de matériaux fins sont, dans le secteur, exacerbés par les dépôts de rejets de dragages du GPMH (dépôts essentiellement vaseux sur le site d'Octeville) et par ceux du GPMR (dépôts essentiellement sableux sur le site du Kannick).

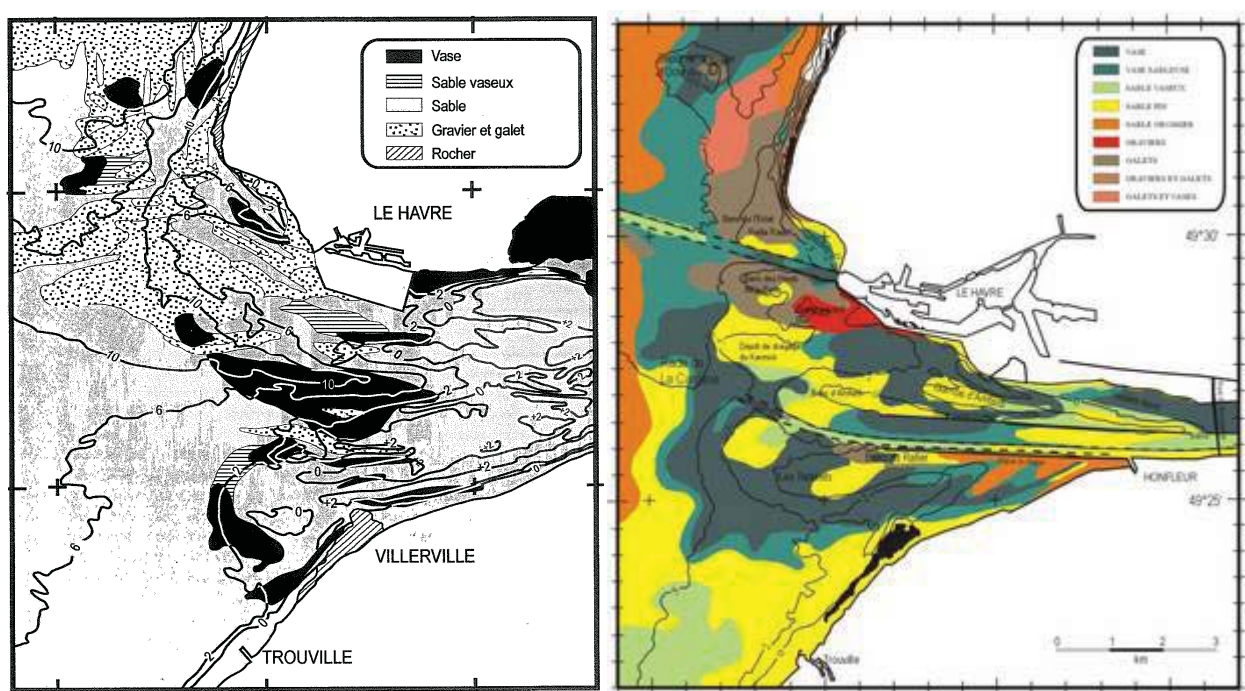


Figure 28 : Cartes de la bathymétrie et de la répartition des faciès sédimentaires dans l'embouchure de la Seine en 1913 (d'après les archives du SHOM) (gauche) et en 1996 (données 1993-1996) (droite). (Dans Lesourd, 2000).



## ii. Evolution du système "baie de Seine Orientale – embouchure"

Une comparaison de la situation établie par Avoine (1981) (Figure 29) avec celle décrite précédemment datant des années 1993 – 1996 (Figure 25) montre que les sédiments vaseux étaient moins bien représentés, notamment à l'embouchure et dans les fonds subtidaux proches. Cette évolution témoigne des apports massifs de vases à la fois à relier à l'évolution naturelle du système et aux nombreux aménagements ayant profondément modifié la morphologie de l'embouchure. De nombreux épisodes de dragage des fonds ont notamment eu lieu et les conditions hydrodynamiques globales et locales ne semblent pas suffisantes pour évacuer les vases piégées dans ce système.

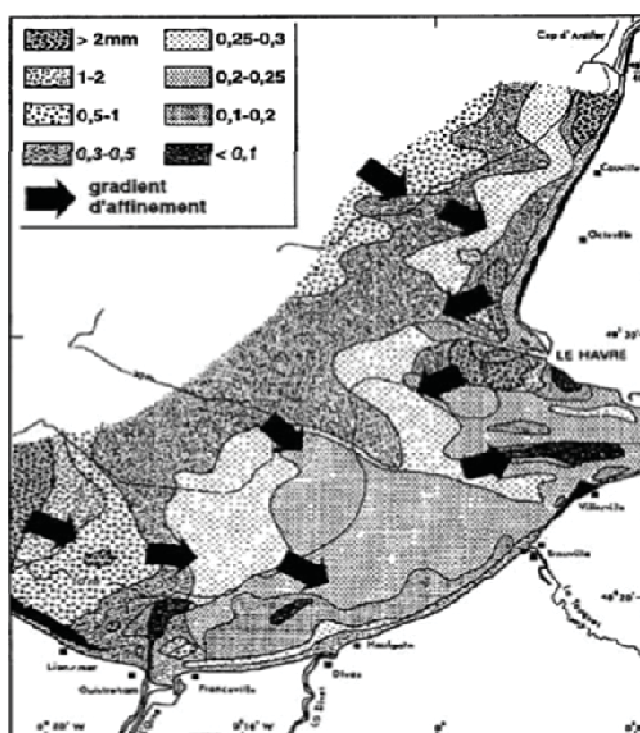


Figure 29 : Répartition granulométrique en baie de Seine Orientale (Avoine, 1981)

Dans le cadre du projet COLMATAGE, une actualisation de la couverture sédimentaire de ces fonds est en cours sur la base des données nouvellement acquises en septembre 2008 et 2009 (une cinquantaine de stations réparties sur les fonds meubles subtidaux sous la sonde des 20 m environ) et en avril 2009 (314 points échantillonnés à l'embouchure et sur les fonds subtidaux proches). La Figure 30 représente la cartographie en cours de construction de la couverture sédimentaire à partir de ces données (Lesourd, non publiée).

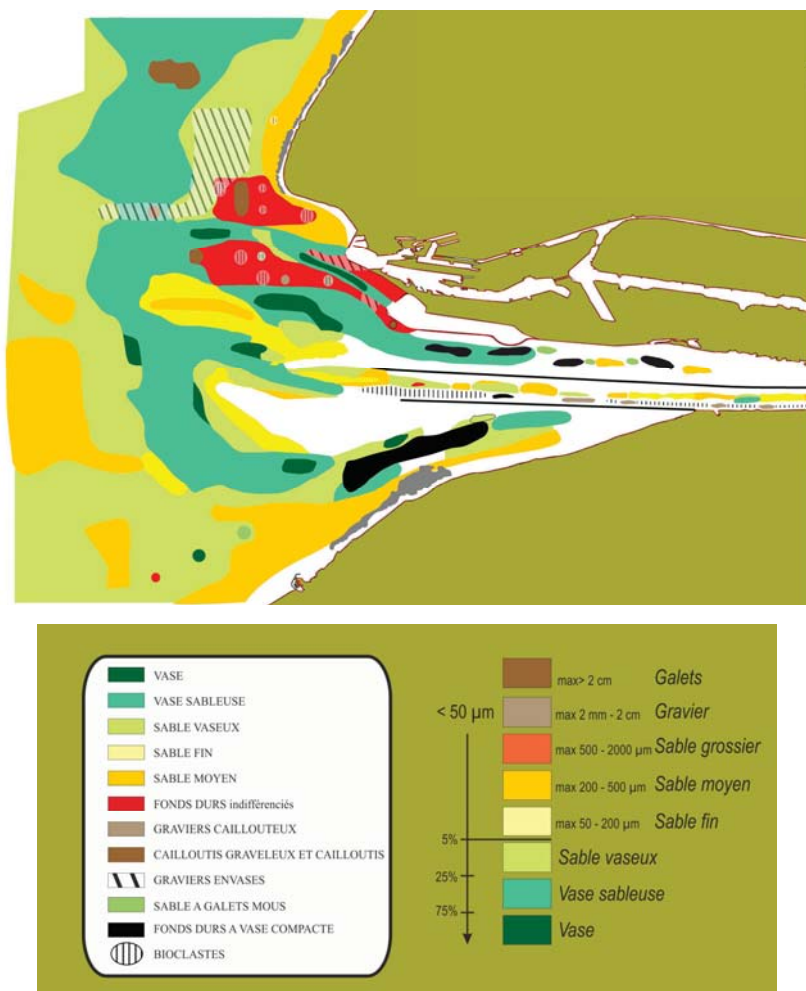


Figure 30 : Carte des faciès sédimentaires de la baie de Seine Orientale (données sédimentaires COLMATAGE 2008-2009 sur la base de 314 points échantillonnés à la benne Shipeck répartis sur septembre 2008, avril et septembre 2009) (Lesourd, en cours, données non publiées).

Nous pouvons noter ici que les cartes sédimentologiques récentes (image de 1993-1996 et de 2008-2009) établies sur le secteur ne sont pas réalisées uniquement à partir des données granulométriques Laser issues des prélèvements à la benne Shipeck. Les sédimentologues se basent également sur des carottages, sur un grand nombre de points incluant plusieurs saisons et sur une bonne connaissance du terrain en termes de morphologie et de dynamique hydrosédimentaire. La tendance observée va dans le sens d'une progression vers l'aval de l'envasement des fonds sédimentaires, et de manière plus marquée à l'embouchure vers le nord-ouest. La ressemblance de cette situation actuelle avec celle d'étiage décrite à l'embouchure lors de prospections antérieures (Lesourd, 2000) est remarquable. Nous remarquons la présence du nouveau faciès des "fonds durs à vase compacte" qui témoigne de l'absence de décharge sédimentaire récente, ce qui est à relier à l'absence de crue significative depuis 2001.

### iii. Evolution en baie de Seine Sud-orientale

L'évolution sédimentaire à long terme peut également être abordée considérant les études menées depuis le début du XIX<sup>ème</sup> siècle dans la baie de Seine Sud-orientale. Ces travaux sont réunis et synthétisés dans Garnaud (2003). A partir de l'étude de cartes anciennes de la distribution des sédiments dans ce secteur, l'auteur identifie une situation à dominante sableuse en 1834, puis une situation envasée en 1880 et 1894 probablement à relier aux premiers aménagements dans l'estuaire (endiguement des rives de Quillebeuf à la Risle). La situation de 1913, de nouveau à dominante sableuse, serait attribuée aux premiers aménagements conséquents à l'embouchure, notamment la construction des digues insubmersibles Nord et Sud jusqu'en amont d'Honfleur qui aurait favorisé le piégeage des vases en amont et un déplacement massif des sables en aval. Depuis cet état des lieux, les descriptions de la couverture sédimentaire dans le secteur ne reprennent qu'en 1967, faute de données disponibles, jusqu'en 2000 (Figure 31). La comparaison de ces trois cartes témoigne d'un net envasement superficiel des fonds meubles subtidaux de la baie de Seine sud-orientale depuis les 30 dernières années. Si les fonds sont encore à dominante sableuse en 1967, ce n'est plus le cas par la suite où il est observé que l'extension des sables envasés (plus de 20 % de fines) a été multipliée par 5 en un peu plus de 20 ans.

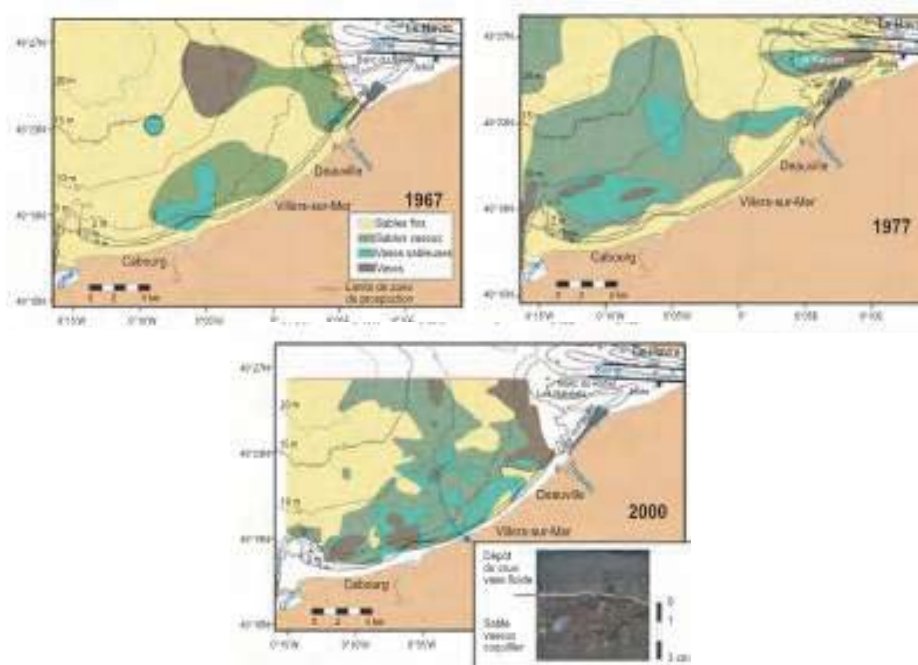


Figure 31 : Cartes de répartition des sédiments superficiels illustrant les variations spatio-temporelles de la distribution la fraction fine ( $< 50 \mu\text{m}$ ) en baie de Seine Sud-orientale (données extraites des cartes originales de Larsonneur et Hommeril (1967) pour la carte 1967, 33 points en mai 1967 ; Avoine (1986) pour la carte 1977, 132 points entre août et septembre 1977 ; Garnaud et al. (2003) pour la carte 2000, 450 points entre février et juin 2000). Garnaud et Garlan (2005).

Cette tendance à l'envasement, décrite également dans le secteur estuarien (Lesourd, 2000 ; Lesourd et *al.*, 2001), est la conséquence des derniers aménagements qui ont provoqué la réduction des sections d'écoulement et le volume de l'estuaire. En effet, le dépôt-centre de la sédimentation s'est déplacé vers l'aval, ainsi que la position du bouchon vaseux.

### ***b. Dynamique saisonnière de la couverture sédimentaire***

Les fortes fluctuations des conditions hydrodynamiques sur les fonds meubles subtidiaux de la baie de Seine Orientale, en raison des multiples forçages, engendrent une intense variabilité spatiale et temporelle des faciès sédimentaires, qui sont la réponse à des phénomènes de dépôts et remises en suspension du matériel sédimentaire fin en place. Malgré le constat d'une tendance générale à l'envasement et au comblement de la partie orientale de la baie de Seine, les dépôts meubles sont soumis à des variations importantes de leur distribution tout au long de l'année, sous l'action des courants résiduels et des houles, et sur des échelles de temps qui peuvent être très courtes. Ils sont également sous l'influence des plus forts apports d'origine fluviale à certaines périodes de l'année, à relier aux débits de la Seine (Avoine, 1981 ; Avoine et *al.*, 1984, 1986b ; Crevel, 1983, 1985 ; Lesourd, 2000 ; Garnaud et *al.*, 2002). Ainsi, la délimitation entre les entités sédimentaires sur ces fonds est rendue délicate notamment au niveau des sables envasés à l'est de l'axe Ouistreham-Antifer. Les représentations cartographiques présentées précédemment correspondent à la superposition de plusieurs événements simultanés ou successifs.

#### ***i. L'estuaire aval***

Les travaux de Lesourd (2000) permettent d'appréhender les variations saisonnières de la couverture sédimentaire au niveau de l'embouchure de la Seine sur la base d'un échantillonnage étalé entre 1993 et 1996 (Figure 32). Pour construire ces cartes de répartition des teneurs en fines ( $< 50 \mu\text{m}$ ), les données correspondantes aux différentes saisons ont été regroupées sans tenir compte de l'année échantillonnée. La situation hivernale (150 sites en février-mars 1994) montre un fort gradient d'envasement à l'embouchure, à relier au dépôt rapide des vases alors que les échantillons avaient été prélevés après un épisode de fortes crues entre janvier et mars 1994. La situation printanière (500 sites en juin 1994, avril 1995, avril-juin 1996) montre que les sédiments fins s'étendent selon un axe nord-sud en face de l'embouchure. En été (250 sites en novembre 1993, septembre 1994, septembre 1996), les gradients d'envasement diminuent encore et les zones les plus envasées sont réduites et décalées vers l'est. Les résultats vont dans le sens de ceux d'Avoine et *al.* (1984) qui ont montré une situation hivernale marquée par un fort envasement à l'embouchure et une situation estivale marquée par un envasement moindre (résultats présentés plus loin).

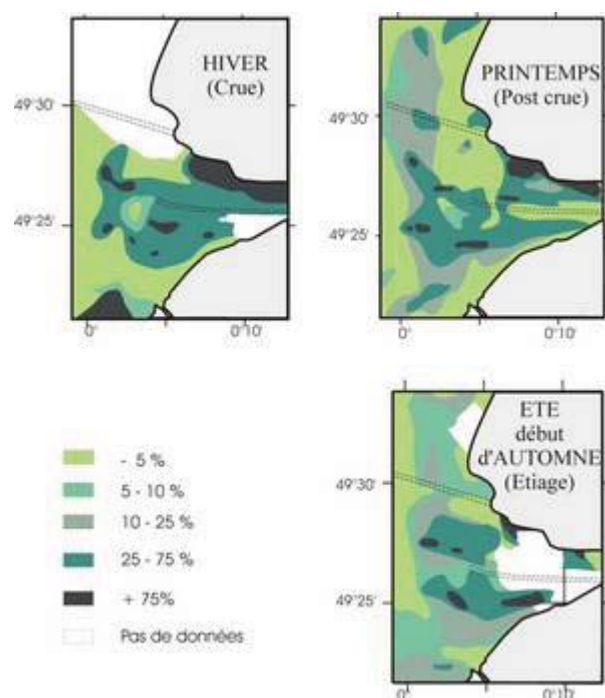


Figure 32 : Cartes de répartition saisonnière des teneurs en fines ( $> 50 \mu\text{m}$ ) à l'embouchure. Crue : février-mars, 150 stations ; Post-crue : avril-juin, 500 stations ; Etiage : septembre-octobre, 250 stations. Lesourd (2000).

Une synthèse de ces observations est présentée Figure 33 (Lesourd, 2000, Lesueur et *al.*, 1997) et met en évidence des secteurs où l'envasement est quasi-permanent, dominant mais fluctuant ou encore sporadique, puis des secteur qui ne sont jamais ensavés. Cette configuration témoigne de zones plus ou moins sous l'influence des apports et plus ou moins abritées des conditions hydrodynamiques qui remettent en suspension et redistribuent les dépôts fraîchement déposés.

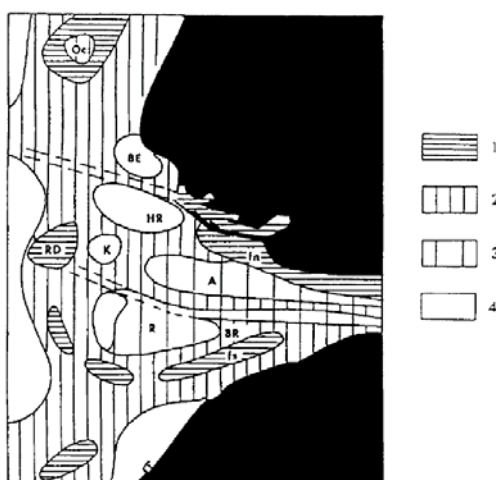


Figure 33 : Synthèse de la sédimentation fine à l'embouchure. 1 : presque toujours ensavé ; 2 : souvent ensavé ; 3 : éventuellement ensavé ; 4 : jamais ensavé. (Lesueur et *al.*, 1997, Lesourd, 2000).

D'autre part les travaux de Lesourd (2000), portant sur les processus sédimentaires et le fonctionnement hydrosédimentaire dans le secteur, montrent que l'étude des caractéristiques de trois phases sédimentaires (vase consolidée difficilement érodée, crème de vase très facilement remobilisable et MES (Matières En Suspension)) permet de comprendre les mécanismes de dépôt et d'érosion des sédiments fins dans l'estuaire.

Ainsi, l'étude (i) de l'évolution au cours du temps des faciès sédimentaires de carottes prélevées au carottiers Reineck et Flusha et (ii) de la cohésion des sédiments fins entre 1996 et 1998 en différents secteurs de l'embouchure montrait plusieurs phases : (i) au moment du plus fort de la crue, des dépôts de matériaux fins se retrouvaient principalement en Rade de la Carosse et à l'engainement en raison d'un processus d'expulsion importante de MES et de crème de vase, (ii) le matériel particulaire était rapidement repris par les conditions hydrodynamiques et s'étendait au chenal nord après ce bref épisode, (ii) puis le matériel fin remobilisable était déplacé à nouveau tout au long de la période d'étiage vers le chenal sud et les zones subtidales externes. Une partie pouvait être réintroduite dans le chenal nord qui fonctionnait alors comme une zone de stockage temporaire de sédiments fins. L'envasement peut être alors direct par expulsion massive de fines lors de la crue ou différé par remaniement et déplacement des fines pendant et après la crue.

Dans un milieu aussi dynamique, la vase peut soit se consolider rapidement, soit être en permanence remobilisée et remise en suspension pour être déplacée. Le tassement des vases peut être rapide, quelques heures suffisent, ce qui est permis par les étales de marée par exemple. La consolidation peut être élevée dans le cas de fortes accumulations et en zone d'abris dynamique, notamment en Rade de la Carosse et dans le chenal nord. Nous pouvons alors rencontrer en période de crue essentiellement des vases molles en cours de consolidation puis en période d'étiage des vases résiduelles consolidées avec des valeurs de cohésion plus élevées. Ainsi, des faciès sédimentaires différents peuvent être distingués en fonction de différents secteurs de l'estuaire caractérisés par un fonctionnement hydrodynamique distinct. Un faciès homogène typique des zones d'envasement permanentes pouvait être retrouvé dans le chenal Nord caractérisé par une sédimentation fine importante avec des valeurs de cohésion forte, et dans les fonds subtidaux au large, à la sonde des 10 m environ, où seules les très fortes houles peuvent venir perturber les fonds. Sur les fonds entre 3 et 5 m environ, les cohésions étaient faibles en toute saison en raison de l'influence des courants de marée et des houles, et on y rencontrait des faciès lités typiques des zones d'envasement temporaires.

Il est cependant précisé que ce schéma d'évolution saisonnière n'est pas nécessairement retrouvé chaque année puisque chaque crue n'a pas le même impact sur la couverture sédimentaire. Cet impact plus ou moins fort est conditionné par le débit fluvial, la durée de la



période d'étiage avant le pic de crue qui contrôle le temps de renouvellement du stock sédimentaire, les conditions de marée lors de la phase de crue, les conditions d'agitation par les houles pendant et peu après la phase de crue qui entravent les processus de consolidation.

Les modélisations du transport et de l'accumulation des fines particules à l'embouchure selon différentes conditions hydrodynamiques (Figure 34 et Figure 35) ont été comparées à ce schéma synthétique (Le Hir et *al.*, 2001). A marée haute et au flot, l'énergie liée aux débits de la Seine étant atténuée, la zone de turbidité maximale est plus cantonnée vers l'amont de l'estuaire alors qu'à basse mer, l'énergie du débit fluvial permet une migration vers l'aval du bouchon vaseux. Cette configuration, obtenue pour un débit moyen, a été comparée à celle obtenue en simulant un contexte de crue avec un débit fixé à  $1000 \text{ m}^3 / \text{s}$ . La zone de turbidité maximale est toujours déplacée vers l'aval pour une basse mer, mais les quantités de MES et de crème de vase déposées sont plus importantes.

Les dépôts de particules fines pour un débit fluvial moyen se font préférentiellement près de la zone de turbidité maximale et là où les contraintes sur le fond engendrées par les courants de marée sont réduites. Ils sont situés à l'ouest et au sud du banc du Ratier, au sud et au nord du chenal de navigation, au sud du port du Havre ainsi qu'en face des digues submersibles et en amont de la brèche de la digue basse Nord. Dans le cas de forts débits (crue), on remarque que la répartition restait globalement identique, mais avec une extension de ces dépôts vers le sud-ouest de l'embouchure. Les faibles profondeurs dans ce secteur empêcheraient le courant résiduel de flot au fond de converger normalement vers l'estuaire. Ces résultats sont bien en accord avec les travaux de Lesourd (2000) et Lesueur et *al.* (1997). Cependant, selon ces conditions de forts débits et avec des conditions de vagues générées par le vent, les résultats montrent un déplacement vers le nord-ouest de ces dépôts et seul le secteur au nord du chenal fait l'objet d'un dépôt de ces particules fines. Dans ce cas, les zones d'envasement permanentes identifiées sur la Figure 33 ne sont plus retrouvées. D'après les auteurs, cette différence pourrait être imputée à une surestimation des contraintes générées par les vagues. Il est également précisé que la modélisation est partie d'un état initial sans dépôt de fines, et simule uniquement la quantité minimale de sédiments déposés au cours d'un unique cycle tidal.

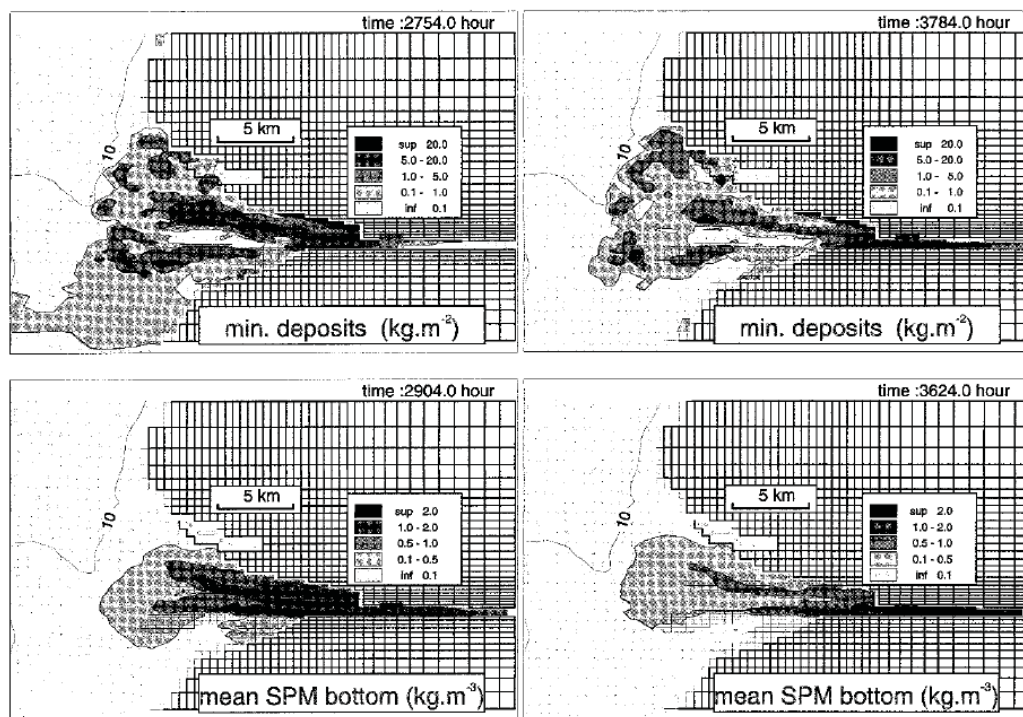


Figure 34 : Simulation 3D des dépôts de sédiments fins en estuaire de Seine. Morte-eaux, dépôts minimums (haut), Vive-eaux, MES près du fond (bas), haut débit (gauche), débit moyen (droite). Le Hir et al., 2001.

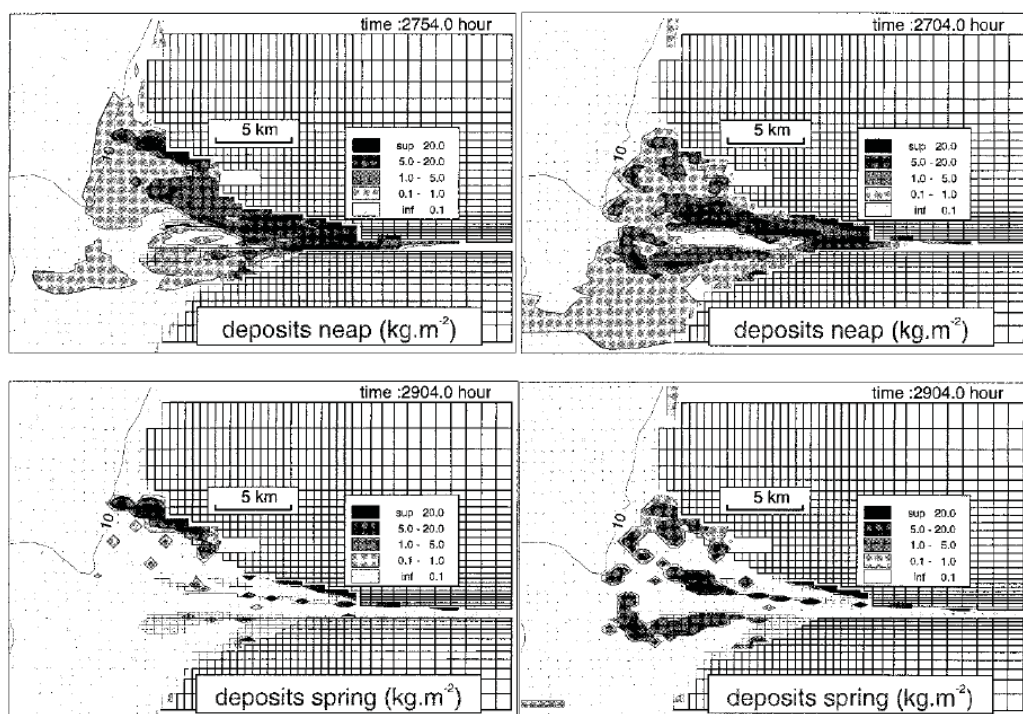
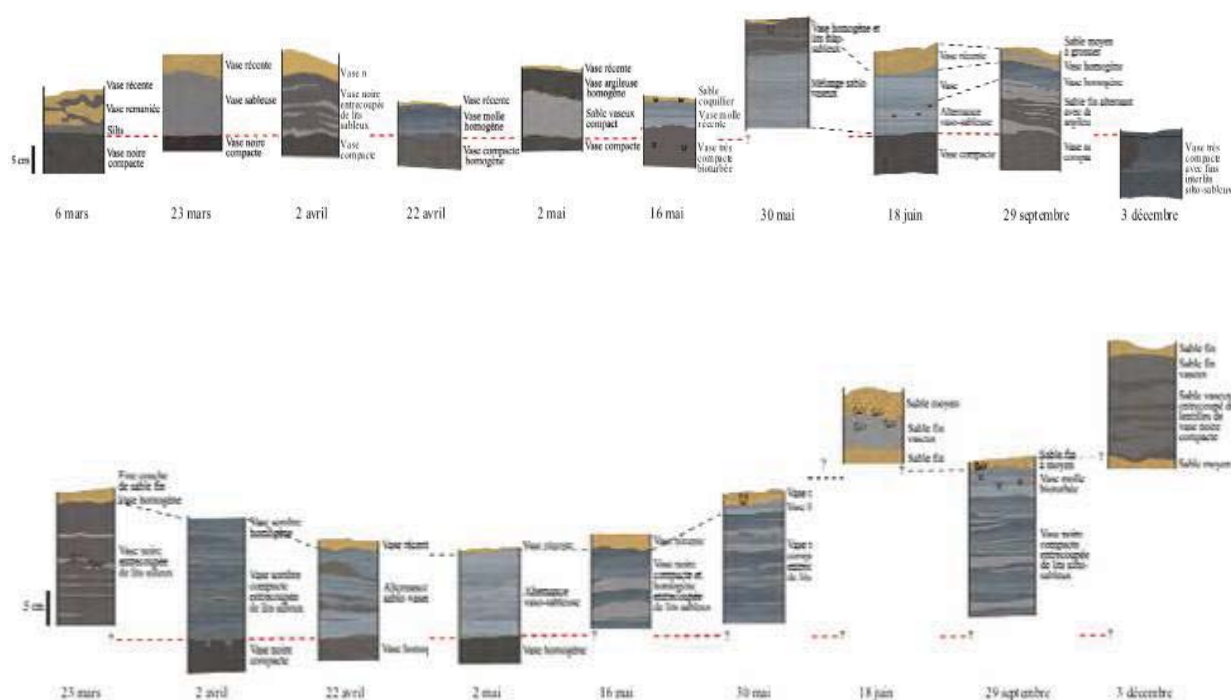


Figure 35 : Simulation 3D des dépôts minimums de sédiments fins en estuaire de Seine. Morte-eaux (haut), Vive-eaux (bas), avec vagues (gauche), sans vagues (droite). Le Hir et al., 2001.



Le secteur est donc soumis à d'importantes perturbations dites ponctuelles ou temporaires. En dépit de cette grande variabilité caractérisant le secteur, les sédiments sableux restent dans l'ensemble mieux représentés en période d'étiage que durant la crue, et ceci de manière plus prononcée pour les stations les plus au large, ce qui va dans le sens des résultats présentés précédemment issus d'études menées dans ce secteur.



45

## ii. Estuaire aval et baie de Seine Sud-orientale

Les travaux de Larssonneur et Avoine (1981); Avoine (1981, 1994); Avoine et *al.* (1984); Avoine et *al.* (1986b) et Avoine et Crevel (1986) ont permis d'appréhender les variations saisonnières de la couverture sédimentaire entre l'embouchure de la Seine et la baie de Seine Sud-orientale entre septembre 1981 et septembre 1982. La Figure 37 représente l'étendue des envasements lors de deux situations extrêmes : une situation estivale (septembre 1981), caractérisée par une faible agitation des eaux et des apports fluviaux négligeables puis une situation hivernale (mai – juin 1982), soumise à des houles et des tempêtes associées à des apports importants en provenance de la Seine. Les cartes de distribution sédimentaire montrent qu'à l'embouchure, les dépôts péloïques ont une extension maximale en période hivernale en période de crue, alors que dans les fonds subtidiaux au large des côtes du Calvados, ils ont une extension maximale en saison printanière en période d'étiage. D'après ces auteurs, en période de crue, les dépôts sont massifs à l'embouchure, puis après la crue, ces dépôts, facilement remobilisables par les houles de tempêtes, sont dispersés par les courants de marée vers les installations portuaires et vers les zones plus au large comme le Parfond. Au printemps, les sédiments fins sont déplacés à nouveau en direction des côtes du Calvados.

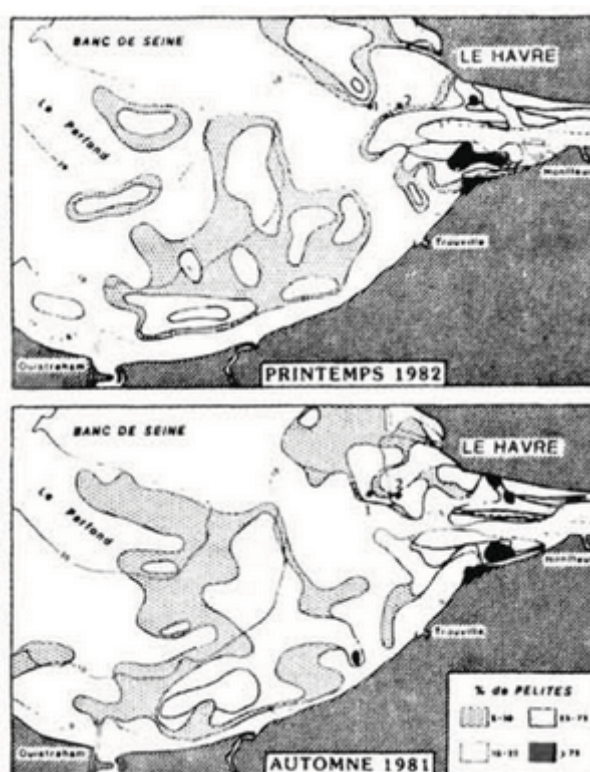


Figure 37 : Répartition des zones d'envasement dans la partie Sud-orientale de la baie de Seine, en crue (printemps 1982) et en étiage (automne 1981). Avoine et *al.* (1984).

D'après Avoine et Crevel (1986), ces variations saisonnières sont en relation étroite avec les apports fluviaux en provenance de la Seine (Figure 38). En liaison avec la circulation résiduelle, une part des apports fluviaux peut être expulsée hors de la baie par le nord-est en période de crue, alors qu'une autre part est réintroduite dans le système après son expulsion en période d'étiage.

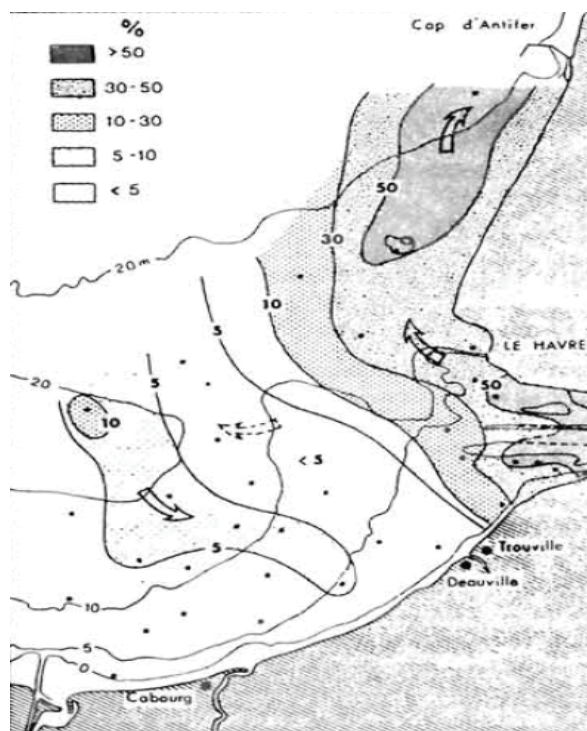


Figure 38 : Part des apports d'origine estuarienne dans les sédiments fins de la partie orientale de la baie de Seine (exprimée en pourcentages). Avoine et al. (1986b).

Plus tard, le suivi de l'évolution de ces fonds à plus haute fréquence, le long d'une radiale côte-large entre Deauville et Villers-sur-Mer en baie de Seine sud-orientale, a été analysé entre septembre 1998 et juin 2001 (Garnaud, 2003). Cette étude a été possible grâce à plusieurs campagnes : BENTHOSEINE (1998 - 1999), VASTEDEBA (2000 - 2001) et FLUXMANCHE (1995). Ce suivi a montré que le secteur était également soumis à des envasements épisodiques événementiels.

La mission de mars 1999 a en effet mis en évidence un apport massif de sédiments fins sur de larges surfaces pouvant ainsi masquer une tendance saisonnière, marquée par un apport différé en période d'étiage. Cet événement semble avoir été la conséquence d'une crue en 1999 caractérisée par une longue période de débits soutenus ( $780 \text{ m}^3 / \text{s}$  en moyenne entre octobre et mars 1999). D'autre part, l'année suivante, la crue de février 2000 qui atteint un pic très élevé ( $> 2000 \text{ m}^3 / \text{s}$ ) n'a pas eu le même effet et l'envasement était moindre sur la zone. Les sédiments

fins ont été expulsés plus au large et le stock sédimentaire entre la crue longue de 1999 et la crue brève de 2000 n'a pas eu le temps de se reconstituer.

Dans Garnaud et *al.* (2002), les auteurs concluent que l'envasement de ce secteur est conditionné par la durée et l'intensité des crues hivernales, ainsi que par la quantité de matériel fin disponible et stocké au sein du bouchon vaseux.

### *iii. La baie de Seine Nord-orientale*

Une étude de la dynamique sédimentaire en baie de Seine Nord-orientale (Crevel, 1985) menée au cours de quatre campagnes (février, mars, mai et septembre 1982) propose un bilan sédimentaire de cette zone (Figure 39).

Ces campagnes ont permis de distinguer dans le secteur trois zones relativement distinctes :

- (i) une zone au large sous l'effet de la résiduelle de marée et des houles, occupée par des sédiments sablo-graveleux mal classés avec un gradient d'affinement du nord au sud ;
- (ii) une zone intermédiaire, dont les profondeurs sont comprises entre 13 et 20 m, soumise à des dépôts fins en provenance des rejets de dragage d'Octeville et d'une moindre mesure de l'estuaire ;
- (iii) une frange côtière où le dépôt de particules fines est compromise car sous l'action prépondérante des houles.

Il est remarqué que la construction de la digue du terminal pétrolier a créé une zone favorable à l'accumulation de particules fines en suspension. Le secteur dit intermédiaire est soumis à une forte variabilité spatiale et temporelle (saisonnière) de la couverture sédimentaire meuble, et comporte des types sédimentaires variés allant des vases aux sables (fins et moyens, voire grossiers) envasés. Cette grande variabilité est à relier à l'action des courants de marée et aux houles, qui sont responsables de la remise en suspension et de l'expulsion des sédiments fins, mais aussi aux apports de particules fines à la fois d'origine anthropique (rejets de dragage) et naturelle (crues), qui se déposent en période de calme hydrodynamique. En effet, alors que les sédiments fins sont bien représentés dans le secteur en février, suite aux apports naturels et anthropiques, ils diminuent en mars suite à une période de forte agitation, reviennent en mai suite à une période de calme hydrodynamique et sont toujours présents en septembre après une période de calme et d'apports réduits.

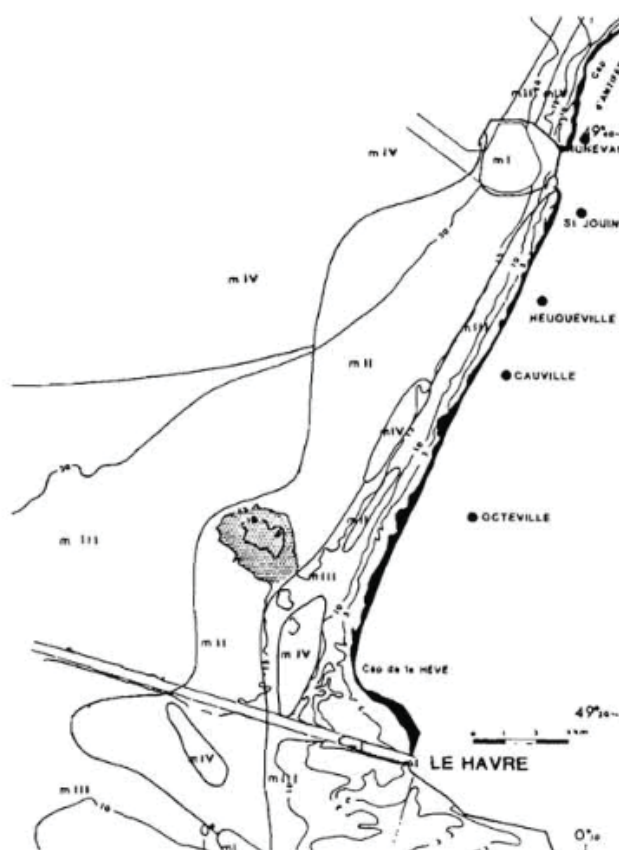


Figure 39 : Cartographie des groupes sédimentaires obtenus par analyse factorielle en baie de Seine Nord-orientale (Crevel, 1985) : (mI) zone d'enrichissement en fines, (mII) zone soumise à envasement périodique, (mIII) sables moyens, (mIV) sables grossiers.

Le secteur au large d'Antifer a également fait l'objet d'une étude de l'évolution saisonnière de la nature des sédiments superficiels par l'équipe d'INTECHMER de Cherbourg. La Figure 40 représente les résultats acquis au large du port d'Antifer en septembre 1998 et en mars 1999, et montre une nette diminution de la fraction fine ( $< 50 \mu\text{m}$ ) entre la situation d'étiage en été et la situation au début du printemps, en période de crue. Ces résultats confortent les observations faites antérieurement (Avoine, 1994 ; Avoine et *al.*, 1996) et peuvent être mis en relation avec une moindre agitation de la mer au cours de cette saison estivale.

Ce schéma d'évolution saisonnier décrit en baie de Seine Nord-orientale a été comparé à celui de la baie de Seine Sud-orientale (Garnaud, 2003) aux mêmes dates. L'auteur montre une tendance contraire en baie de Seine Sud-orientale avec un taux d'envasement plus important en mars 1999 au début du printemps qu'en septembre 1998 à l'étiage. Il conclut que si la baie de Seine Sud-orientale est soumise à des variations saisonnières avec envasement différé, elle est également marquée par des événements exceptionnels en fonction de la fréquence, de l'intensité et de la durée des crues de la Seine.



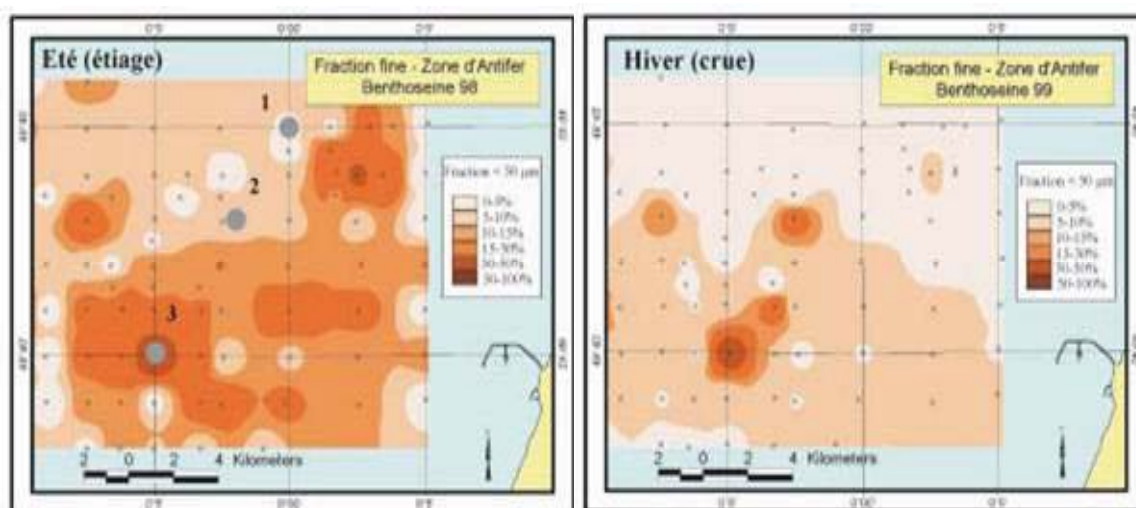


Figure 40 : Teneurs en fraction fine dans les sédiments superficiels prélevés au large du port d'Antifer en septembre 1998, campagne BENTHOSEINE 1998 et en mars 1999 campagne BENTHOSEINE 1999 (dans Garraud, 2003).

## IV. MACROFAUNE BENTHIQUE ET FACTEURS STRUCTURANTS

### A. LE SYSTEME "MANCHE - BAIE DE SEINE"

#### 1. Unités "bentho-sédimentaires"

Les premières grandes prospections du domaine benthique qui ont été conduites à l'échelle de la Manche dans la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle (Cabioch, 1968 ; Holme, 1961, 1966) se sont poursuivies dans les années 1970 sous la coordination de Louis Cabioch (Station Biologique de Roscoff). Elles ont abouti aux premières cartographies à large échelle spatiale de la distribution des organismes benthiques en relation avec leur environnement hydro-sédimentaire (Cabioch et Gentil, 1975, Gentil, 1976, Gentil et Cabioch, 1997a, Cabioch et Glaçon, 1975, Cabioch et Glaçon, 1977, Cabioch et *al.*, 1978 ; San Vicente Anorve, 1995).

Les prélèvements ont été réalisés à la drague Rallier du Baty, engin d'échantillonnage dit "semi-quantitatif". Selon Gentil et Cabioch (1997a), ce choix s'explique par son emploi possible sur tous types de substrats et par la possibilité de définir, au moins qualitativement, l'ensemble des communautés macrobenthiques de la Manche.

Diverses études ont complété ce travail et ont permis d'affiner les cartes de distribution des peuplements benthiques ou de juger de leur évolution (Souplet et *al.*, 1980; Davoult et *al.*, 1988; Desroy et *al.* 2003; Alizier, 2005; Garcia, 2006; Foveau, 2008, 2009). D'après les travaux de Cabioch et *al.* (1978), neuf communautés benthiques ont été identifiées en Manche Orientale (Figure 41). A cette échelle, le caractère le plus remarquable de leur distribution est leur



ordonnement en systèmes édaphiques régionaux liés aux séquences sédimentaires, elles-mêmes structurées par le gradient d'intensité hydrodynamique.

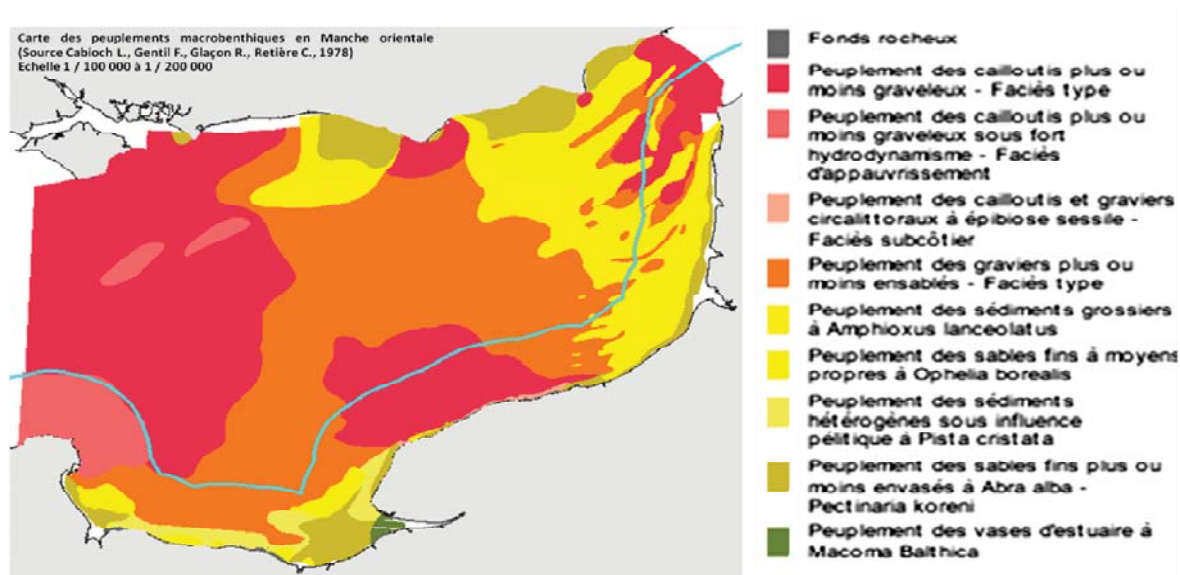


Figure 41 : Carte numérisée (produit REBENT) des communautés benthiques identifiées en Manche Orientale (Source : Cabioch L., Gentil F., Glaçon R. et Retière C., 1978).

Une partie de ces données historiques a été ré-analysée dans la thèse de Sanvicente-Anorve (1995) en utilisant diverses techniques d'analyses multivariées. Cette étude a mis en avant l'existence d'une grande variété d'images obtenues en fonction des types d'analyses réalisées et des descripteurs pris en compte. Malgré tout, le bilan est en faveur d'une forte cohérence spatiale des structures benthiques en relation avec leur environnement sédimentaire, certaines typologies respectant les ensembles sédimentaires de Larssonneur et *al.* (1982).

La répartition de la macrofaune benthique en Manche peut également être mise en relation avec la température (Holme, 1966; Cabioch et *al.*, 1977; Gentil et Cabioch, 1997b). Ainsi le gradient climatique longitudinal est à cette échelle un facteur déterminant dans la répartition de nombreuses espèces. Deux grand ensembles sont définis : les espèces occidentales nombreuses comprenant des espèces "boréo-océaniques", océaniques et de la faune tempérée chaude puis les espèces orientales moins nombreuses "boréo-arctique" ou boréales. Cette classification est en outre à relier aux plus forts écarts thermiques rencontrés à l'entrée de la Manche par rapport à ceux rencontrés en Manche orientale. Il résulte de ces conditions climatiques une diminution de la diversité spécifique d'ouest en est (Cabioch et Glaçon, 1977; Hecq et *al.*, 1992; Heip et *al.*, 1992; Gee et Warwick, 1996; Dauvin, 1999; Dauvin et *al.*, 2003; Desroy et *al.*, 2003) et la presqu'île du Cotentin constitue une barrière géographique infranchissable pour de nombreuses espèces (Ellien et *al.*, 2000 ; Jolly et *al.*, 2004).

En réalisant un "zoom" sur la baie de Seine, les explorations menées par Cabioch et ses collaborateurs ont permis la cartographie et la description de plusieurs entités "benthosédimentaires" (Gentil, 1976 ; Cabioch & Gentil, 1975 ; Cabioch & Glaçon, 1977 ; Gentil & Cabioch, 1997a ; Gentil & Cabioch, 1997b) en concordance avec le double gradient sédimentaire et d'intensité hydrologique constaté par Larssonneur (1971). Huit unités "benthosédimentaires" majeures sont identifiées et peuvent être regroupées en deux grand ensembles "benthosédimentaires" : (i) celui des fonds grossiers localisés principalement au large et au centre de la baie où les courants de marée sont intenses puis (ii) celui des fonds sableux près des côtes où l'intensité hydrodynamique est réduite (Figure 42). Les compositions faunistiques de chacune de ces unités présentent alors les plus fortes affinités avec celles de la Manche orientale (Cabioch et Gentil, 1975 ; Gentil, 1976, 1980 ; Gentil & Cabioch, 1997b).

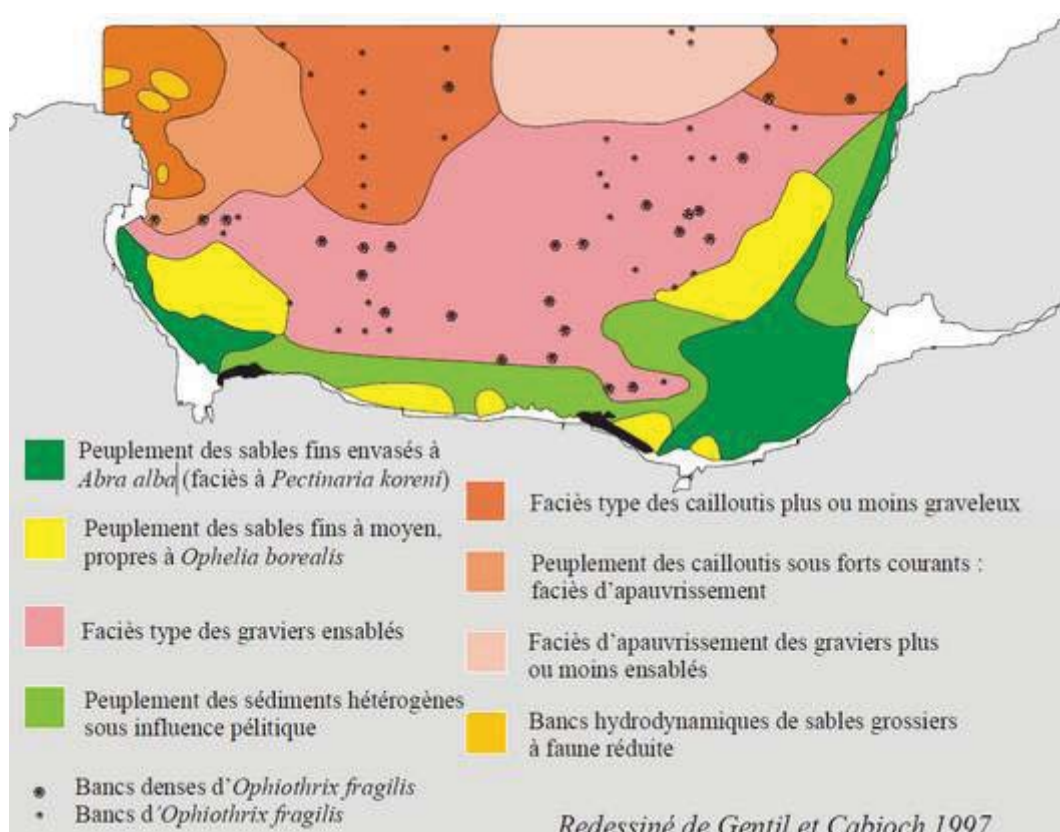


Figure 42 : Communautés macrobenthiques de la baie de Seine et du sud de la Manche centrale redessinée de Gentil et Cabioch (1997a)

Ainsi, à l'échelle de la Manche et de la baie de Seine, les cartes de répartition des communautés benthiques et sédimentaires sont superposables. Cette superposition montre que la granulométrie des sédiments, elle-même contrôlée par l'intensité hydrodynamique, semble toujours le principal facteur de structuration de la macrofaune benthique.

## 2. Evolution à long terme et dynamique saisonnière

### a. Evolution en à long terme en Manche Orientale

Les travaux de Foveau (2009) ont conduit à dresser un nouvel état des lieux de la distribution des communautés benthiques en relation avec les sédiments pour la période 2006–2007. La comparaison de cette nouvelle situation à la situation antérieure (Holme, 1961, 1966 ; Cabioch et collaborateurs, 1971 – 1976) a permis d'aborder son évolution à long terme à l'échelle de la Manche orientale. Malgré beaucoup de biais dans les méthodologies d'acquisition des données entre les deux périodes, et après de multiples analyses multivariées montrant chacune des images différentes de la nouvelle situation (2006 – 2007), Foveau (2009) conclue en faveur d'une stabilité de la distribution des ensembles "benthosédimentaires" entre ces deux périodes espacées d'une trentaine d'années. Quatre assemblages relativement pérennes sont identifiés, celui des sables moyens dunaires assimilé à la communauté des sables moyens propres à *Ophelia borealis*, celui des cailloutis assimilé à la communauté de cailloutis à épibiose sessile, celui des graviers ensablés et celui des sables grossiers qui est vu comme une unité de transition entre les sables moyens dunaires et les graviers ensablés. Les changements perçus se situeraient le plus souvent au niveau des assemblages de transition entre des unités "benthosédimentaires" majeures et bien définies comme celles citées ci-dessus. Ces résultats sont concordants avec l'approche similaire qu'avait eue Sanvicente-Anorve (1995) en traitant les données de Cabioch et ses collaborateurs, ils mettent une fois de plus en avant la difficulté d'établir des délimitations précises entre les unités "benthosédimentaires".

### b. Evolution à long terme et dynamique saisonnière en baie de Seine

Les fonds subtidaux à l'échelle de la baie de Seine ont été revisités en septembre 1998 et en mai 1999 (campagnes BENTHOSEINE) dans le cadre des travaux de Ghertsos (2002). Cette étude a permis d'aborder quantitativement (prélèvements à la benne Hamon) l'organisation faunistique et la variabilité saisonnière à cette échelle, ce qui n'était pas le cas des travaux antérieurs de Cabioch et ses collaborateurs (prélèvements estivaux à la drague pendant plusieurs années).

La Figure 43 montre les quatre principaux groupes définis en baie de Seine pour ces deux campagnes : (i) Le premier est composé d'espèces types de la communauté à *Abra alba* définie par Gentil et Cabioch (1997a) et, tout comme ce dernier, présente un faciès type à *Pectinaria koreni* et un faciès hétérogène envasé ; (ii) le second groupe, par comparaison avec Gentil et Cabioch (1997a) est considéré comme un mélange entre trois communautés : celle des sédiments hétérogènes à *Pista cristata*, celle des graviers plus ou moins ensablés et celle des sables fins à moyens dunaires et propres à *Ophelia borealis* ; (iii) le troisième groupe est celui des graviers à

*Ophiothrix fragilis* qui est vu selon l'auteur comme un faciès à *Ophiothrix fragilis* de la communauté des graviers définie dans Gentil et Cabioch (1997a) ; (iv) Associé au troisième groupe en 1998, le quatrième groupe identifié en 1999 n'est représenté par aucune espèce indicatrice en raison du détachement de l'ensemble des graviers à *Ophiothrix fragilis* (Ghertsos, 2002). Il est remarqué que plus on se rapproche des côtes, plus la structuration apparaît hétérogène.

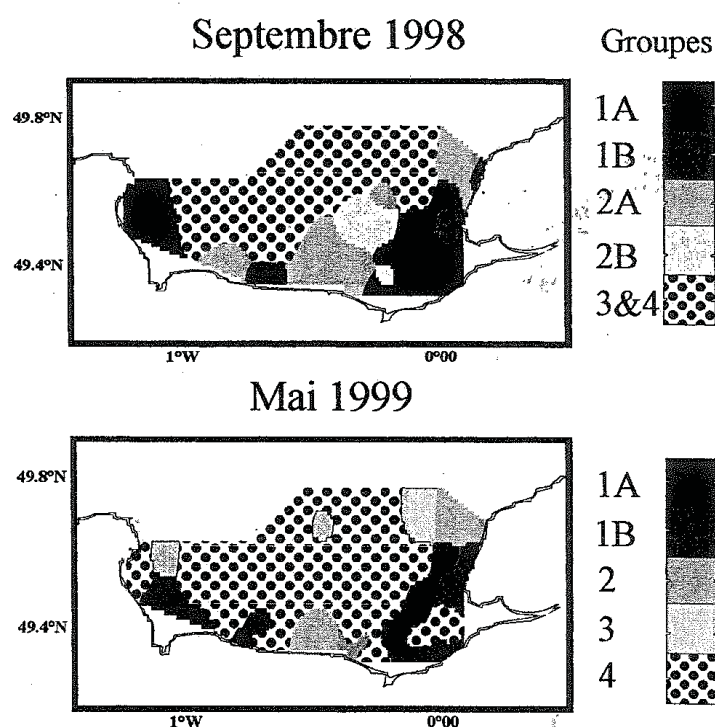


Figure 43 : Distribution spatiale quantitative des communautés benthiques en baie de Seine (campagnes BENTHOSEINE de septembre 1998 et mai 1999) d'après Ghertsos (2002). Méthode de cartographie utilisant les probabilités Bayésiennes de Souissi et al. (2001).

La Figure 44 représente une synthèse de la distribution spatiale des quatre principaux groupes faunistiques identifiés à partir des campagnes BENTHOSEINE (1998 – 1999). L'auteur observe des similarités entre cette distribution et celle proposée pour les années 1970 de Gentil et Cabioch (1997a). La délimitation des sables fins envasés à *Abra alba* (comprenant le faciès type à *Pectinaria – koreni* et le faciès hétérogène envasé) est remarquablement bien conservée entre les deux périodes. L'ensemble des graviers plus ou moins ensablés est également conservé dans les stations plus au large et au centre de la baie. Un groupe s'individualise cependant pour la période 1998–1999 et peut être vu comme un secteur faisant la liaison entre la communauté à *Abra alba* et celle des graviers du large. D'après Gherstos (2002), ce nouveau groupe pourrait être le résultat de l'expression saisonnière de la structuration spatiale de la macrofaune benthique.

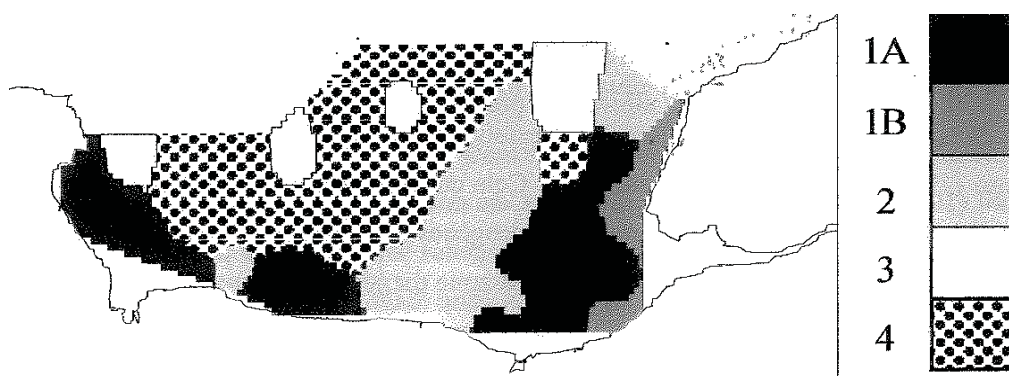


Figure 44 : Carte synthétique de la répartition spatiale quantitative des communautés benthiques en baie de Seine (synthèse des campagnes BENTHOSEINE de septembre 1998 et mai 1999) d'après Gherstos (2002). Méthode de cartographie utilisant les probabilités Bayésiennes de Souissi et al. (2001).

Ainsi, l'étude de ces assemblages faunistiques en 1997 et 1998 a permis de mettre en avant quelques similitudes de leur composition faunistique décrite dans les années 1970. Cependant, juger de l'évolution des communautés benthiques entre les années 1970 et les années 1997-1998 ne saurait être plus précis au regard des différentes stratégies d'étude utilisées (efforts et méthodes d'échantillonnage, méthodes d'analyse des données et paramètres étudiés). Alors que les assemblages faunistiques côtiers semblent spatialement plus étendus en période automnale (septembre 1998) et que cela soit probablement dû à un effet saisonnier, une grande prudence doit être accordée à cette hypothèse compte tenu des deux seules dates d'échantillonnage prises en compte. En effet, le système étudié est soumis, comme nous l'avons vu, à de multiples forçages pouvant intervenir à des échelles de temps et d'espace variées.

L'étude des relations entre les groupes définis et les paramètres environnementaux n'a pas été concluante, Gherstos (2002) souligne d'ailleurs la difficulté de mettre en avant les principaux facteurs structurant l'organisation définie par les assemblages faunistiques. En considérant la baie dans son ensemble, il montre que les facteurs les plus structurants seraient i) la profondeur, les graviers grossiers et graviers fins en septembre 1998 et ii) la profondeur, les sables fins et moyens en mai 1999. Cependant au sein des groupes rencontrés en baie de Seine, la nature sédimentaire n'a plus le rôle de facteur structurant, et quelques groupes montrent des relations avec la chlorophylle, les phaeopigments et la teneur en Matière Organique totale sans que ces résultats ne soient clairement significatifs.

Si l'on compare les cartes de distribution des sédiments et les cartes de distribution des assemblages faunistiques, il semble raisonnable de penser que les sédiments, eux même contrôlés par l'intensité hydrodynamique, ont encore un rôle structurant pour la macrofaune benthique à l'échelle de la baie de Seine. L'assemblage principal défini au centre de la baie est






superposable aux sédiments les plus grossiers et les assemblages mineurs définis à la côte, pris dans leur ensemble, sont superposables aux sédiments les plus fins. Ainsi, il ne semble pas qu'il y ait eu de changements majeurs entre la situation des années 1970 et celle des années 1997 – 1998.

## B. LE SYSTEME "BAIE DE SEINE ORIENTALE – EMBOUCHURE"

Le système " baie de Seine Orientale – embouchure " couvre l'ensemble bio-sédimentaire des fonds sableux de la partie orientale de la baie de Seine et des vases d'estuaire identifiés lors des travaux d'exploration des communautés benthiques en Manche des années 1970. Il correspond au secteur étudié dans le cadre de ma thèse. Suite à ces premières prospections, plusieurs travaux de reconnaissance de ces fonds ont été entrepris et ont conduit à plusieurs cartographies représentant différents assemblages faunistiques. Ces travaux permettent aujourd'hui d'apprécier leur évolution à long terme, leur dynamique et de discuter des facteurs potentiels de leur structuration.

### 1. Unités "bentho-sédimentaires"

La première cartographie des unités "bentho-sédimentaires" en baie de Seine Orientale publiée par Cabioch et Gentil (1975) définit trois unités principales (Figure 45) dont l'étendue spatiale correspond à la zone présentement étudiée dans le cadre de ma thèse (à l'est de l'axe Antifer – Ouistreham):

-  la communauté des vases d'estuaire à *Macoma baltica* en fond d'estuaire,
-  la communauté des sables envasés à *Abra alba* (faciès à *Pectinaria koreni*) au sud-est du secteur en continuité avec le fond estuarien, à laquelle se rattache le faciès des sédiments hétérogènes sous influence pélitique à *Pista cristata* le long des côtes entre le Havre et Antifer
-  la communauté des sables fins à moyens propres à *Ophelia borealis*, plus au large, dans les zones plus profondes bordant la sonde des 20 mètres environ.

Deux autres communautés sont définies au large de ce secteur mais ne correspondant pas à l'ensemble des fonds sableux côtiers, on distingue : (i) la communauté des graviers plus ou moins sableux à *Glycymeris glycymeris* – *Echinocyamus pusillus* et (ii) la communauté des cailloutis à épibiose sessile avec un faciès à *Ophiethrix fragilis*.



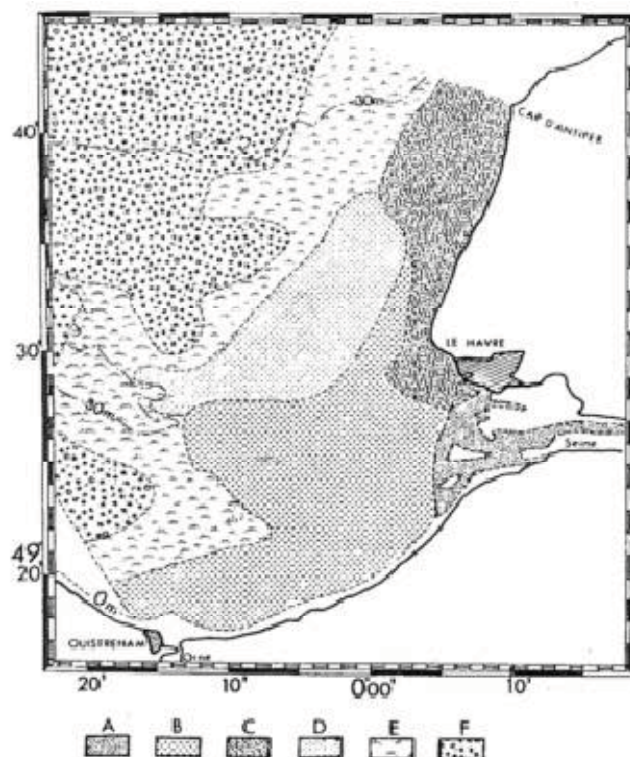


Figure 45 : Carte des communautés benthiques de la baie de Seine Orientale redessinée de Cabioch et Gentil (1975). A : Communauté oligospécifique des vases d'estuaires à *Macoma balthica* ; B-C : Communauté des sables fins plus ou moins envasés à *Abra alba-Pectinaria koreni* (C : Faciès hétérogène envasé à *Pista cristata*) ; D : Communauté des sables moyens propres à *Ophelia borealis* ; E : Communauté des graviers plus ou moins sableux à *Glycymeris glycymeris-Echinocyamus pusillus* ; F : Communauté des graviers à épibiose sessile avec un faciès à *Ophiothrix fragilis*.

Etablies à partir de mêmes données, les communautés décrites dans Cabioch et Gentil (1975) sont les mêmes que celles décrites dans Gentil et *al.*, 1997, et cette carte peut être vue comme un "zoom" sur la baie de Seine Orientale. On remarque cependant que la répartition spatiale du faciès hétérogène diffère d'une représentation cartographique à l'autre (Figure 42). Si les délimitations entre les unités "bento-sédimentaires" s'avèrent complexe à l'échelle de la Manche comme vu au travers des travaux de Sanvicente-Anorve (1995) et Foveau (2009), ce problème se retrouve ici et de façon encore plus marquée à l'échelle du système "baie de Seine Orientale – embouchure". Il est à noter que ces cartes, représentant une vue synthétique de la distribution de la macrofaune benthique en relation avec son environnement hydro-sédimentaire, ont été construites à la fois à partir d'analyses variées et par une expertise propre à chaque auteur. Les différentes délimitations peuvent alors fluctuer en fonction i) de l'interprétation écologique propre à chacun ; ii) de l'échelle d'observation ; iii) du choix des descripteurs, des variables prises en compte et de l'importance qui leur est attribuée. Il est d'ailleurs précisé dans Cabioch et Gentil (1997), que la carte produite donne une idée globale de la distribution des communautés mais que les limites ne doivent pas être considérées strictement.

## 2. Evolution à long terme du système "baie de Seine Orientale – embouchure"

L'évolution du système "baie de Seine Orientale – embouchure" peut être abordée au travers de la Figure 46 (Dauvin et *al.*, 2002). Elle représente une carte synthétique des communautés rencontrées à cette échelle intégrant plusieurs campagnes de prospections des fonds depuis celles conduites dans les années 70 par Cabioch et ses collaborateurs.

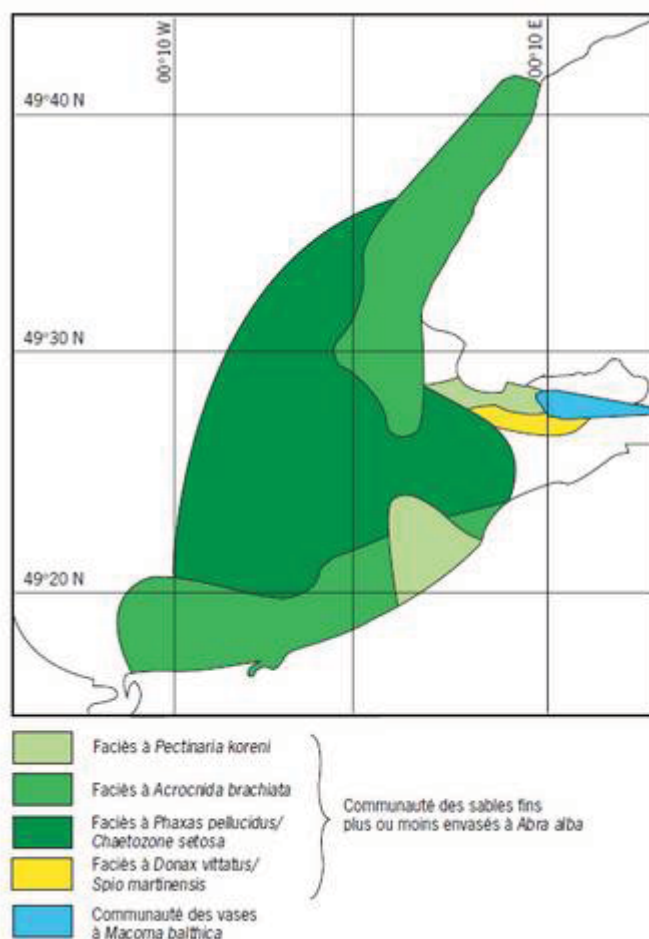


Figure 46 : Carte de distribution spatiale des assemblages macrobenthiques subtidaux en baie de Seine Orientale (Dauvin et *al.*, 2002 et données non publiées).

Des similitudes sont observées si on la compare aux cartes établies par ces derniers (Figure 45), on distingue encore la communauté des sables envasés à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* au large et à l'embouchure externe puis la communauté des vases à *Macoma balthica* dans la partie interne de l'embouchure. Là encore, il ne faut pas considérer strictement les délimitations entre les différentes unités proposées, notamment en ce qui concerne la communauté des sables fins plus ou moins envasés à *Abra alba* définie ici.

En effet, la cartographie de cette communauté intègre plusieurs années de suivi (1986, 1987, 1988 et 1991) analysées dans le cadre des travaux de Thiébaud (1994) et Thiébaud et *al.* (1997).

Les données correspondent alors à un suivi initié en 1986 avec un pas de temps aujourd'hui stabilisé à cinq ans (Campagnes PECTOW), sur la base d'un réseau d'une soixantaine de stations. D'autre part, et comme nous le verrons par la suite, elle est caractérisée par une variabilité temporelle marquée ainsi que par une hétérogénéité spatiale prononcée. Nous verrons également que si les deux principales communautés sont encore reliées à un affinement granulométrique des sables envasés au large vers les vases à la côte, les différents faciès identifiés au sein de la communauté à *Abra alba* ne sont plus reliés à la nature sédimentaire et les facteurs de structuration de la macrofaune benthique en faciès à cette échelle ne sont pas clairement établis.

A l'embouchure, un suivi a été réalisé par la CSLN (Cellule de Suivi du Littoral Normand) depuis septembre 2000 avec deux campagnes annuelles depuis 2003 (mars et septembre), sur un réseau d'une trentaine de stations. Jourde (2009) témoigne de la difficulté à montrer des tendances évolutives de la macrofaune benthique, d'autant que le système n'est pas stabilisé en raison des nombreux travaux d'aménagement. Néanmoins, les communautés définies dans les années 70 sont toujours présentes en relation avec la granulométrie des sédiments et le degré de marinisation des habitats : la communauté des sables fins envasés à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* dans la partie aval de l'embouchure et la communauté des vases estuariennes à *Macoma balthica* en amont. Janson (2007) ayant traité une partie de ces données avait également identifié cette structuration.

Ainsi, si l'on considère ces résultats dans leur ensemble, il ne semble pas qu'il y ait eu de changements majeurs depuis les premières prospections de ces fonds et la granulométrie des sédiments a encore le rôle de structurer les communautés benthiques.

### **3. Dynamique inter-annuelle et évolution à long terme de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni***

L'étude des données des campagnes d'échantillonnage du suivi PEWTOW, couvrant la communauté des sables envasés à *Abra alba* – *Pectinaria koreni*, a permis la cartographie spatio-temporelle d'assemblages benthiques à partir d'analyses multivariées (Thiébaud, 1994, Thiébaud et al., 1997, Barnay, 2003).

Barnay (2003) avait choisi de regrouper les stations par classification ascendante hiérarchique sur des données d'abondances faunistiques sans transformation, en utilisant la métrique de Bray Curtis et en tenant compte des espèces présentes dans plus de 5 % des stations. Les analyses, sensibles à la présence d'espèces très abondantes dans les données, avait défini des regroupements en conséquence et avaient mis en avant les noyaux d'abondances de l'annélide polychète tubicole *Owenia fusiformis*.

Le partitionnement de la zone étudiée dans le temps (1986-1987-1988-1991-1996-2001) était alors relativement bien préservé. Thiébaud (1994), Thiébaud et *al.* (1997) avait utilisé une technique d'AFC en tenant compte des espèces présentes dans plus de 5 % des stations et en choisissant de projeter en individus supplémentaires les espèces montrant de forts effectifs extrêmement localisés. Les regroupements formés, choisis plus nombreux, étaient moins déterminés par les noyaux d'abondances d'*Owenia fusiformis*, mais l'analyse restait sensible aux abondances relatives d'autres espèces.

En comparant les deux approches pourtant menées à partir du même jeu de données, il est alors remarqué que les assemblages faunistiques diffèrent selon les analyses employées et par la façon dont sont prises en compte les espèces rares et/ou les fortes abondances des espèces principales de la communauté. Aussi, dans le cadre de l'étude de la structuration spatiale du benthos et de son évolution temporelle, une grande variabilité dans les résultats peut être constatée tant au niveau du nombre de groupes définis et de leur délimitations dans l'espace qu'au niveau des espèces qui les caractérisent. Alors qu'elle peut s'apprécier d'une année sur l'autre, elle est également constatée pour une même année selon la stratégie et la méthode employée par chaque auteur. Outre l'influence de la sensibilité des analyses dans l'interprétation des résultats, la macrofaune benthique est soumise à d'importantes fluctuations de ses abondances. Il en résulte une difficulté à établir, au sein de cette communauté, des limites précises entre les assemblages faunistiques qui la caractérisent. Les différences spatiales et temporelles des limites et caractéristiques des assemblages faunistiques, définis par analyse factorielle des correspondances (Thiébaud, 1994) ou par classification ascendante hiérarchique (Barnay, 2003), sont imputables à la dominance spatio-temporelle relative aux espèces les plus abondantes de la communauté.

Comme il est communément admis par la communauté scientifique que les sédiments structurent fortement la distribution du benthos, des études réalisées à cette échelle étaient principalement vouées à décrire ces relations. Cependant, la tentative de mettre en relation ces assemblages (formés sur la base des valeurs d'abondance des espèces) avec les caractéristiques sédimentaires (pourcentages de tailles de grains et indices calculés sur ces données) n'a pas été concluante. Aucun patron clair de structuration en assemblages de la macrofaune benthique en relation avec la granulométrie des sédiments ne se dessine (Thiébaud, 1994 ; Barnay, 2003). Alors qu'une tendance à l'envasement a pu être constatée par les sédimentologues à l'embouchure (Lesourd, 2000 ; Lesourd et *al.*, 2001) et en baie de Seine Sud-orientale (Garnaud et *al.*, 2002), Barnay (2003) n'a montré aucune réponse significative de la macrofaune benthique que ce soit à l'échelle de la Carosse, devant l'embouchure qu'à l'échelle de la baie de Seine Orientale. Les auteurs concluent alors que les sédiments ne structurent pas significativement la distribution des

assemblages benthiques de la communauté étudiée. Ainsi, des assemblages faunistiques sont décrits mais ne sont pas clairement expliqués par les caractéristiques environnementales.

Malgré les difficultés à s'accorder, la communauté benthique prise dans son ensemble est considérée par ces auteurs comme relativement stable dans le temps puisque caractérisée i) par un petit nombre d'espèces abondantes retrouvées chaque année malgré les fortes variations de leurs effectifs et ii) par la persistance de leur structuration en "noyaux" d'abondance le long d'une bande côtière d'Ouistreham à Antifer. Des études menées en parallèle ont d'ailleurs montré qu'un processus de rétention larvaire en relation avec : (i) une migration ontogénique verticale des larves en relation avec la circulation en double couche estuarienne ; (ii) les faibles courants résiduels et (iii) 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 (Lagadeuc, 1992; Thiébaud, 1994, 1996; Thiébaud et *al.*, 1994, 1995, 1996; Olivier et *al.*, 1996b; Olivier, 1997; Ellien et *al.*, 2000, 2004; Barnay, 2003).

#### **4. Dynamique pluriannuelle à saisonnière à l'embouchure**

Les travaux de Janson (2007) à l'échelle de l'embouchure de la Seine, zone soumise à des dynamiques hydro-sédimentaire contrastées, ont permis de juger de l'état et de l'évolution du compartiment benthique en relation avec les sédiments à différentes échelles de temps (pluriannuelle, annuelle et bimensuelle). Les assemblages faunistiques sont identifiés comme faisant partie (i) de la communauté type des sables fins plus ou moins envasés à *Abra alba* pour les stations les plus au large et (ii) de la communauté des vases à *Macoma balthica* pour la partie la plus en amont. Le secteur étant soumis à des phases de dépôts et d'érosions successives et ponctuelles de sédiments d'origines diverses, la réponse de la macrofaune benthique a été évaluée. Ces mécanismes sont plus prononcés en Fosse Nord et Sud, si bien que des changements de composition faunistique significatifs peuvent y être observés. L'étude de Janson (2007) a montré que des coévolutions ponctuelles peuvent être clairement observées, mais uniquement dans des situations d'événements sédimentaires majeurs et à l'échelle de la station. Il n'y a donc pas, dans ces zones internes, d'ensemble sédimentaire bien défini, mais plutôt une mosaïque de faciès qui évoluent de façon asynchrone au cours du temps. Ce serait alors moins le cas dans la partie la plus marine de l'embouchure où les assemblages évoluent de façon comparable, sans présenter de brusques modifications. Les dépôts sédimentaires y sont alors le plus souvent temporaires et principalement observés lors de la période d'étiage. A l'échelle de l'échantillonnage, Janson (2007) a ainsi conclu à un meilleur synchronisme de l'évolution saisonnière au niveau de l'embouchure externe plutôt que dans sa partie interne. Il semble qu'à la dynamique bio-sédimentaire puisse être attribué : i) une phase printanière durant laquelle la



faune est sous l'influence de sédiments fins et ii) une phase estivale et hivernale au cours de laquelle elle est plus sous l'influence de dépôts sableux. Cependant, l'évolution saisonnière des types sédimentaire dans ce secteur ne montre pas de gradient clairement établi, et seule une tendance à l'envasement dans la Fosse Sud a été remarquée au printemps.

L'étude a donc montré que la dynamique sédimentaire dans cette zone pouvait influencer la répartition de la macrofaune benthique sans qu'une véritable corrélation de la réponse de la faune à la nature et l'intensité des dépôts ne soit mise en avant. Alors que ce constat est discuté en fonction de nombreux autres facteurs potentiels de structuration de la macrofaune, des expérimentations ont mis en avant la capacité de la faune à réajuster sa position à l'interface eau-sédiment en réponse à un ensevelissement par les sédiments. Cette capacité de mobilité confère donc à la macrofaune benthique un seuil de tolérance à la dynamique sédimentaire à laquelle elle est soumise, pouvant expliquer en partie le di-synchronisme observé. Il est précisé que cette aptitude serait toutefois plus faible en hiver qu'en été et les adultes sembleraient moins adaptés et moins résistants à des ensevelissements sédimentaires brusques que les juvéniles.

Ces résultats permettent de reposer le problème des échelles spatiales et temporelles dans l'étude des relations benthos-sédiments, ils permettent de débattre sur la relative stabilité des assemblages benthiques en termes de capacité de la faune à résister à un environnement fluctuant.

Janson (2007) précise que ce processus de rétention larvaire caractéristique à l'échelle de la baie de Seine Orientale, couplé à la résistance des individus aux dépôts sédimentaires en période printano-estivale, contribueraient à une restructuration rapide des communautés macrobenthiques à l'embouchure de la Seine. De plus, la structuration de la macrofaune en mosaïque d'habitats pourrait favoriser la recolonisation rapide des points impactés par les zones non impactées adjacentes. D'après Guerra-Garcia et Garcia-Gomez (2006), les processus et le temps de recolonisation par la faune sont fonction de nombreux facteurs comme l'hydrodynamisme, les caractéristiques physico-chimiques du substrat, ou encore la proximité des communautés qui favoriserait une recolonisation progressive des zones endommagées.

## V. CONCLUSIONS

Nous avons pu apprécier au travers de cette synthèse d'études antérieures, visant à étudier la structuration et l'organisation du compartiment benthique dans le secteur oriental de la baie de Seine, l'influence sur les résultats obtenus (i) de l'échelle spatio-temporelle d'observation et (ii) de la sensibilité des analyses statistiques à la nature des données.

Alors que de l'échelle de la Manche à celle de la baie de Seine orientale, et quelque soit la méthodologie employée, les communautés macrobenthiques définies sont reliées à des séquences

sédimentaires relativement distinctes, ce n'est plus le cas au sein d'une communauté. A cette échelle, les études des relations macrobenthos - sédiment, au travers d'assemblages faunistiques et à partir de techniques d'analyse variées n'ont pas été concluantes. Elles n'ont ni apporté de réponse positive quand à leur éventuelle structuration par les caractéristiques granulométriques des sédiments ni mis en évidence de réponse claire aux phénomènes d'envasement pourtant constatés par les sédimentologues. Il est probable que les relations entre les assemblages faunistiques et la nature sédimentaire n'aient pas été clairement établies parce que l'échelle d'observation n'était pas pertinente (Ghertsos, 2002). Ainsi, il est possible que dans un environnement aussi fluctuant et caractérisé par une mosaïque marquée à petite échelle, la grille et/ou la fréquence de l'échantillonnage ne soient pas adaptées. De plus, à l'abord des côtes le système tend à se complexifier en réponse à l'anthropisation, à l'action hydrodynamique plus chaotique et à l'influence des eaux du fleuve, ce qui laisse entendre que d'autres facteurs comme la salinité ou la température peuvent aussi avoir le rôle de structurer la faune.

Toujours dans l'objectif de mieux comprendre la structuration du benthos au sein de la communauté à *Abra alba*, plusieurs études menées en parallèle ont principalement montré la variété des sources de variabilité et de structuration de la macrofaune benthique. Elles ont entre autre montré qu'il y avait de fortes mortalités observées juste après fixation des jeunes recrues. Les travaux d'Olivier (1997), menés expérimentalement et rejoignant les résultats de Dauvin (1992), ont montré que les taux de survie des recrues pouvaient être considérablement réduits dans les premiers mois suivant leur fixation.

Les courants de marée peuvent être responsables de la réduction des effectifs de recrues en favorisant les processus d'érosion par les sédiments (Armonies, 1994 ; Olivier et *al.*, 1996a ; Elmgren et *al.*, 1986 ; Bouma et *al.*, 2001). Olivier et *al.* (1996b) montre que des espèces comme *Abra alba* et *Pectinaria koreni* ont des capacités intrinsèques de quitter activement un habitat défavorable pour retrouver de bonnes conditions à leur survie. La compétition interspécifique a été mise en avant en baie de Seine (Thiébaud, 1997) dans le cas de dépôts simultanés de post-larves d'*Owenia fusiformis* et de *Pectinaria koreni*. De tels phénomènes ont également été identifiés au sein de la communauté à *Abra alba* en mer du nord entre *Abra alba* et *Lanice conchilega* ou *Tellina fabula* (Dewarumez et *al.*, 1986). Sur une série de 15 années montrant l'évolution temporelle d'*Abra alba* de 1977 à 1991 en baie de Seine Orientale, Dauvin et *al.* (1993) ont identifié l'existence d'un cycle décennal de forts recrutements.

Ces quelques exemples sont loin de fournir une liste exhaustive des nombreux facteurs potentiels de structuration de la faune sur ces fonds, mais ils illustrent déjà la diversité des processus et de leurs interactions à diverses échelles de temps et d'espace. De nombreuses réponses de la faune à ces facteurs sont aujourd'hui mises en évidence, mais les échelles spatio-

temporelles ne sont pas encore clairement identifiées. Il conviendra dans cette étude, de montrer comment certains de ces facteurs potentiellement structurants et intervenant à diverses échelles d'espace et de temps, peuvent expliquer les patrons de distribution de la macrofaune benthique identifiables à l'échelle du système "baie de Seine orientale – embouchure".



Elle regroupe les données géo-référencées (exprimées en degrés décimaux dans le système WGS84) d'abondances standardisées (ind. / m<sup>2</sup>) du macro-zoo-benthos, puis fournit les valeurs de la plupart des indices de diversité et des indicateurs benthiques couramment utilisés dans l'analyse de la qualité biologique des communautés benthiques. On peut également y trouver des données de biomasses (exprimées en g de Poids Sec Libre de Cendres ou en g de Poids Secs), ainsi que des renseignements sur l'écologie et les préférences trophiques de la plupart des taxa rencontrés. La Figure 48 représente la structure de la base et montre les différents champs renseignés. Pour plus d'informations sur le contenu exact de cette base de données et sur les différents champs renseignés, consulter Ruellet et Dauvin (2007). Des informations sont également disponibles sur le site Seine-Aval : <http://seine-aval.crihan.fr/web/>.

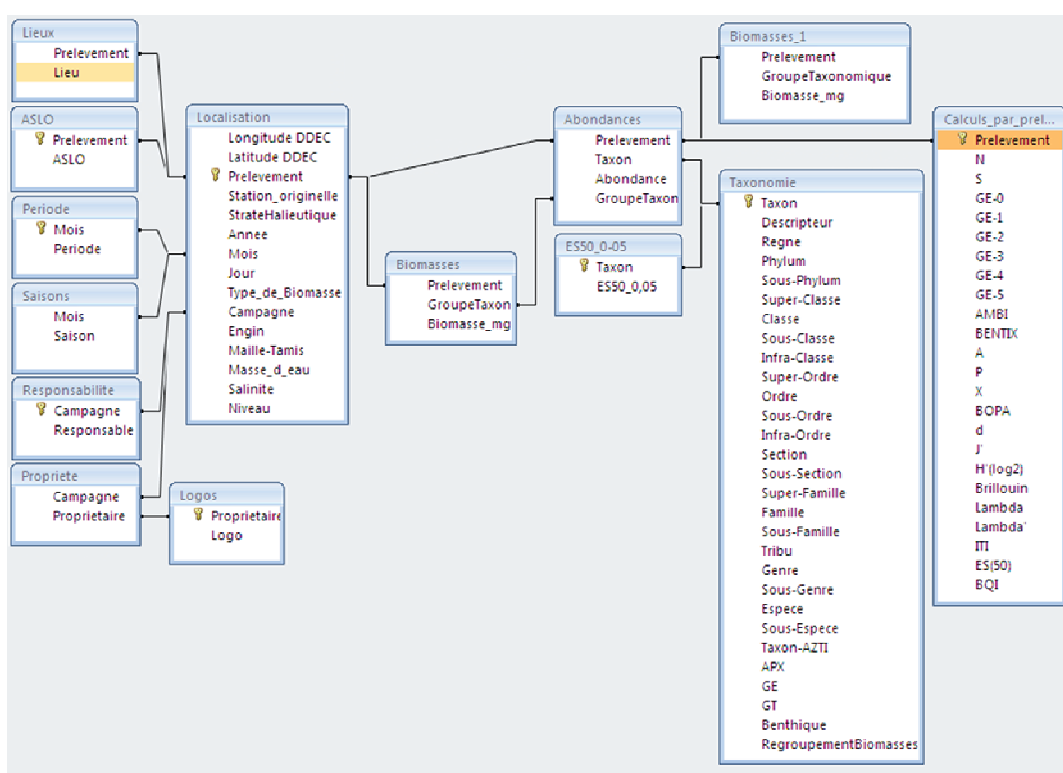


Figure 48 : Structure de la base de données MABES 3 réalisée sous Access pour le GIP dans le cadre du projet COLMATAGE (Ruellet et Dauvin, 2007).

Cependant, les divers objectifs ayant motivé ces prospections conduisent à l'existence de données qui sont difficilement strictement comparables. En effet, les étendues spatiales et les périodes échantillonnées diffèrent fortement d'une campagne à l'autre, rendant l'exploitation de l'ensemble de ces données plus que délicate. D'autre part, il n'existe pas de stratégie commune d'échantillonnage et s'aventurer à exploiter l'ensemble de ces données nécessite de prendre en compte de nombreux biais. Parmi ces biais figurent les techniques d'échantillonnage (maille du



tamis de lavage, engins d'échantillonnage), les méthodes de traitement des échantillons (précision de la phase de tri), ainsi que l'expertise propre à chaque personne ayant identifié les espèces. Les principales caractéristiques de chaque campagne figurant dans la base de données MABES sont synthétisées dans le Tableau 1.

## B. LES DONNEES SEDIMENTAIRES (BASE " SEDIMENTS ")

Dans le cadre du projet COLMATAGE, de nombreuses données de sédiments ont été rassemblées et une base de données " sédiments " a été réalisée sous Excel pour le GIP par Sandric Lesourd. Ces données, issues d'études contractuelles ou réalisées dans le cadre du programme Seine-Aval, correspondent à de nombreux travaux de prospection des fonds réalisés en baie et estuaire de Seine depuis la fin du XX<sup>ème</sup> siècle jusqu'en 2008. Cette base ne constitue cependant pas un recensement exhaustif des données acquises dans ce secteur mais regroupe néanmoins un total de plus de 4000 points échantillonnés lors de 64 campagnes qui se sont déroulées en secteurs subtidaux et/ou intertidaux dans le cadre de programmes financés par des industriels, des organismes de recherche ou encore par des collectivités publiques. Ces campagnes ont été réalisées de façon ponctuelle ou bien dans le cadre de suivis. Elles regroupent les données géo-référencées (exprimées en degrés décimaux dans le système WGS84) issues d'analyses granulométriques, réalisées par tamisage ou par méthode Laser et exprimées en pourcentage de taille de grains. On peut également y trouver des renseignements sur le nombre de tamis utilisés dans le cas de la méthode par tamisage et sur la maille du tamis de lavage utilisée pour obtenir le pourcentage de fines dans les échantillons. La Figure 49 représentant spatialement tous les points prospectés et recensés dans la base "sédiments" montre un effort d'échantillonnage soutenu en baie de Seine Orientale et à l'embouchure.

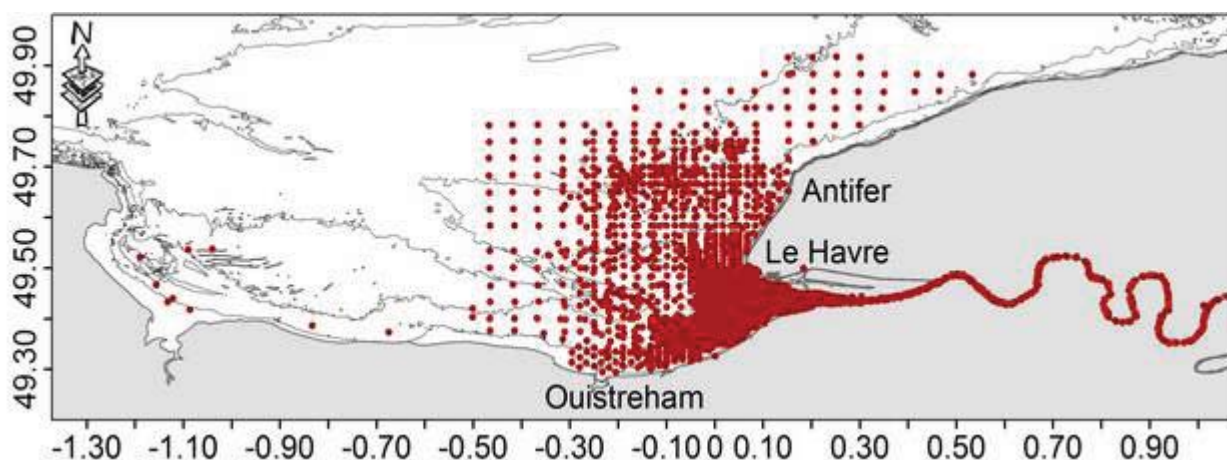


Figure 49 : Carte de distribution de l'ensemble des stations échantillonnées en baie de Seine et disponibles dans la base de données "sédiments" (données sédimentaires recensées dans le cadre du projet COLMATAGE, 4000 points et 64 campagnes).

Tableau 1 : Caractéristiques principales de la base de données MABES

Année	Campagne	Engin d'échantillonnage	nombre des sites échantillonnés par mois												Maille de tamisage		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	0.5mm	1mm	2mm
1978	SAUV	Suceuse									44						x
1979	Thèse Despre	Quadra					6	9		22	46		8			x	
	SAUV	Suceuse		20							17						x
	Phosphogypse	Suceuse															x
1980	Thèse Despre	Carottier					10								x		
1981	Phosphogypse	Benne Smith McIntyre									5					x	
1982	Phosphogypse	Benne Smith McIntyre	3		5			5								x	
1983	Phosphogypse	Benne Smith McIntyre	3				5				5					x	
1984	Phosphogypse	Benne Smith McIntyre			5						5			5		x	
1985	Phosphogypse	Benne Smith McIntyre				5			5			5				x	
1986	PECTOV	Benne Hamoir		36													x
	Phosphogypse	Benne Smith McIntyre						5					5			x	
1987	PECTOV	Benne Hamoir		46							22					x	x
	GVN	TASV														x	
	Phosphogypse	Benne Smith McIntyre			5			5				5				x	
1988	PECTOV	Benne Hamoir		64													x
	Phosphogypse	Benne Smith McIntyre				3			5			3		3		x	
1989	Phosphogypse	Benne Smith McIntyre				3		5				2				x	
1990	GVN	TASV											12			x	
	Phosphogypse	Benne Smith McIntyre		5												x	
1991	PECTOV	Benne Hamoir			64												x
1992	GVN	TASV										16				x	
1993	SEAV	Benne Smith McIntyre											14			x	
1994	GVN	TASV										10				x	
1995	SEAV	Carottier					3									x	
		Drague Rallier du Baty					11					12				x	
1996	INTRMUI	TASV				26					25					x	
	PECTOV	Benne Hamoir			78												x
1997	INTRMUI	TASV		26					27		27		26			x	
	LANICI	Benne Hamoir			55							54					x
1998	CIM	TASV									7					x	
	DBA	TASV									7					x	
	INTRMUI	TASV		27		26			27			26		25		x	
	BENTHOSEIN	Benne Hamoir									44						x
	Octeville	Benne Van Veer											24				x
	SEAVBEN	Benne Hamoir										24				x	
1999	BENTHOSEIN	Benne Hamoir					46										x
2000	RNE	TASV									28					x	
	Port 2000	Benne Smith McIntyre									49					x	
		Drague Rallier du Baty									4					x	
2001	Fosse Norc	Benne Hamoir		11				11			11			11		x	x
	RNE	TASV									31					x	
	PECTOV	Benne Hamoir		61													x
2002	RNE	TASV										31				x	
	Thèse Janso	Benne Hamoir			23		23				23					x	x
		Benne Van Veer			8	9	15	5			5		5			x	
	Port 2000	Benne Smith McIntyre									15					x	
2003	RNE	TASV									30					x	
	Octeville	Benne Smith McIntyre										32				x	
	Port 2000	Benne Smith McIntyre			23						24					x	
		Drague Rallier du Baty			3						2					x	
2004	Méandre	TASV									5					x	
	RNE	TASV									30					x	
	Octeville	Benne Smith McIntyre										12	20			x	
	Port 2000	Benne Smith McIntyre			26							22	5			x	
		Drague Rallier du Baty			2							2				x	
2005	RNE	TASV										32	3		x		
	Octeville	Benne Smith McIntyre										23	9			x	
	Port 2000	Benne Smith McIntyre			26							24				x	
		Drague Rallier du Baty			2							4				x	
2006	Canau	Benne Smith McIntyre											17			x	
		Quadrat horizontal											4			x	
		Quadrat vertical											2			x	
		TASV											6			x	
	Chenal Rouer	Benne Hamoir			8											x	
	Eco Consu	Benne Ekmar						6							x		
		Benne Hamoir						37							x		
		Benne Van Veer						8							x		
		Brossage du substrat						22							x		
		Epuisette						28							x		
		Epuisette et mair						7							x		
		mair						1							x		
		Sciage du substrat						6							x		
		Substrat artificiel						9							x		
		TASV													x		
	RNE	Benne Hamoir			74						34						x
	PECTOV	Benne Smith McIntyre					24					25				x	
	Port 2000	Drague Rallier du Baty					3					4				x	
		TASV			9							9				x	
2007	RNE	TASV									23	8			x		

Tableau 2 : Caractéristiques principales de la base de données "sédiments"

Année	Campagne	Engin d'échantillonnage	Type de donnée	nombres de sites échantillonnés par mois											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1986	Biogéophy SUIVI	Benne Smith Carottier Reineck	description description					34	27			106	27		
1987	Biogéophy	Benne Smith	description		39		17							12	
1988	Biogéophy PECTOW	Benne Shipeck Benne Hamon	description Colonne 3 tamis Colonne 5 tamis			1 64		55							
	SUIVI	Carottier Reineck	description				27						27		27
1989	PlancSeine SUIVI	Benne Smith Carottier Reineck	description description						9					27	9
1991	Epsom Fluxmanche PECTOW	Benne Van veen Benne Shipeck Benne Hamon	description description Colonne 14 tamis				57			204			23		
1993	SEDIBAIE	Benne Shipeck	Colonne 12 tamis Colonne 4 tamis description									198 53 14		68 23	
1994	SEDIBAIE	Benne Shipeck	Colonne 1 tamis Colonne 12 tamis		81 6	1 28 11			38 1			14			
		Carottier kullenberg Main	description Colonne 12 tamis Colonne 12 tamis			11						2			
1995	SEAWAIN	Benne Shipeck	Colonne 12 tamis Colonne 4 tamis description		52 69 2										
	SEAWAIN - Flumanche SEDISE	Benne Shipeck Benne Shipeck	Colonne 12 tamis Colonne 1 tamis Colonne 12 tamis Colonne 4 tamis description	44		44		2 30 180 13	15 17 3						
1996	INTERPRO PECTOW SEAV SED	Benne Shipeck Benne Hamon Benne Main Benne Shipeck	Colonne 12 tamis Colonne 13 tamis Colonne 12 tamis Colonne 1 tamis Colonne 12 tamis Colonne 13 tamis Colonne 15 tamis Colonne 4 tamis description			62	5 248 22 14 3 4		5 2 62 6			57			
		Cône Berthois  Main Univ Rouen Benne main Eckman	Colonne 12 tamis Colonne 15 tamis description Colonne 12 tamis Colonne 14 tamis Colonne 9 tamis				25 2 7 6				3 35 1 16 1		7 1		
1997	SEAV SED	Benne Shipeck	Colonne 14 tamis Colonne 15 tamis description Laser 0,04µm Laser 0,004µm		1 191 120 31	7 1 51			41 46			11 13 33			16
	Vasière Nord	Main								8				2	
1998	Benthoseine PNOG SEAV SED	Benne Shipeck Benne Shipeck Benne Shipeck	Colonne 7 tamis Colonne 15 tamis description Laser 0,04µm Laser 0,004µm Laser 0,04µm		1 64 13							84 35			
	SEAV SED Vasière Nord	Cône Berthois Benne Shipeck Main	Colonne 7 tamis Colonne 8 tamis Colonne 9 tamis Colonne 10 tamis Colonne 11 tamis Colonne 12 tamis Colonne 13 tamis Colonne 14 tamis Laser 0,004µm	1 2				1		10				1 2 1 2 2 1 1 1 5	
1999	Benthoseine	Benne Shipeck	Colonne 19 tamis description description Laser 0,04µm					146 68 27 14							13
	Vasière Nord	Carottier Reineck Main				3									
2000	Automne 2000 GEMEL Vastedeba	Benne Smith Mc Intyre ? Benne Shipeck Carottier Reineck	LSP Colonne 14 tamis description description		55 7		6								
2001	PECTOW SUIVI Vastedeba	Benne Hamon Carottier Reineck Benne Shipeck Carottier Reineck	Colonne 13 tamis description description description			60			27 39 8						
2002	port 2000 SEAV ALJ Seine Aval	benne Smith McIntyre Benne Van veen Benne Hamon	Colonne 18 tamis Laser 0,004µm Colonne 18 tamis			5 24	8	15 23	5			15 5			5
2003	port 2000	benne Smith McIntyre	Colonne 18 tamis									14			
2004	automne 2003 Printemps 2003 automne 2004 Printemps 2004	Benne Smith Mc Intyre Benne Smith Mc Intyre Benne Smith Mc Intyre Benne Smith Mc Intyre	5 classes a partir LS230 LSP exp txt lg 5 classes a partir LS230 LSP						? 24 ? ? 24 ? ? 24 ? ? 27 ?						
	Automne 2005 Printemps 2005	Benne Smith Mc Intyre Benne Smith Mc Intyre	LSP exp txt lg LSP exp txt lg						? 34 ? ? 29 ?						
2006	Automne 2005 Automne 2006 Automne 2007 Printemps 2006 PECTOW	Benne Smith Mc Intyre Benne Smith Mc Intyre Benne Smith Mc Intyre Benne Smith Mc Intyre Benne Hamon	LSP exp 29 classes LSP exp txt lg LSP exp 29 classes LSP exp txt lg Colonne 14 tamis			74			? 1 ? ? 31 ? ? 1 ? ? 35 ?						
	Automne 2007 Printemps 2008	Benne Smith Mc Intyre Benne Smith Mc Intyre	LSP Colonne 16 tamis voie humide LSP						? 36 ? ? 1 ? ? 49 ?						

Cependant, les divers objectifs ayant motivé ces prospections conduisent à l'existence de données qui sont difficilement comparables strictement. En effet, les étendues spatiales et les périodes échantillonnées diffèrent fortement d'une campagne à l'autre et il n'existe pas de protocole commun d'échantillonnage. De nombreux biais sont à prendre en compte parmi lesquels figurent les techniques d'échantillonnage et les méthodes de traitement des échantillons. Les principales caractéristiques de chaque campagne figurant dans la base de données "sédiments" sont synthétisées dans le Tableau 2. Il est à noter que ce récapitulatif n'est que provisoire, la base de données "sédiments" n'étant pas définitive. Elle est en effet en constante évolution en fonction des données toujours en cours d'acquisition.

### **C. LES DONNEES FAUNE-SEDIMENT EXPLOITEES DANS CETTE ETUDE**

Puisque mon travail de thèse porte essentiellement sur les relations entre la faune et les sédiments des fonds benthiques subtidaux de la baie de Seine Orientale, une sélection des données MABES a été réalisée en conséquence.

Seuls les points échantillonnés dans le secteur d'étude de COLMATAGE et comportant à la fois des données de macrofaune benthique subtidale et les données de sédiments associées ont été sélectionnés.

De plus, pour faire face à d'éventuelles difficultés d'interprétation relatives aux différentes méthodologies employées, le suivi PECTOW couvrant les fonds subtidaux de la partie orientale de la baie de Seine et son embouchure jusqu'à la sonde des 20 m environ, a été privilégié. Les listes faunistiques de chaque campagne d'échantillonnage ont été étudiées et modifiées pour palier à d'éventuelles erreurs d'identification. Certaines espèces ont ainsi été ramenées au genre ou à la famille. La liste homogénéisée des espèces ainsi prise en compte figure en Annexe 2 de ce mémoire.

Enfin, pour faciliter les comparaisons, seules les stations communes aux différentes années prospectées ont été prises en compte. C'est donc un ensemble de 41 stations échantillonnées au cours des campagnes PECTOW 1988, 1991, 1996, 2001 et 2006 qui sont prises en compte dans ce mémoire (Figure 50).

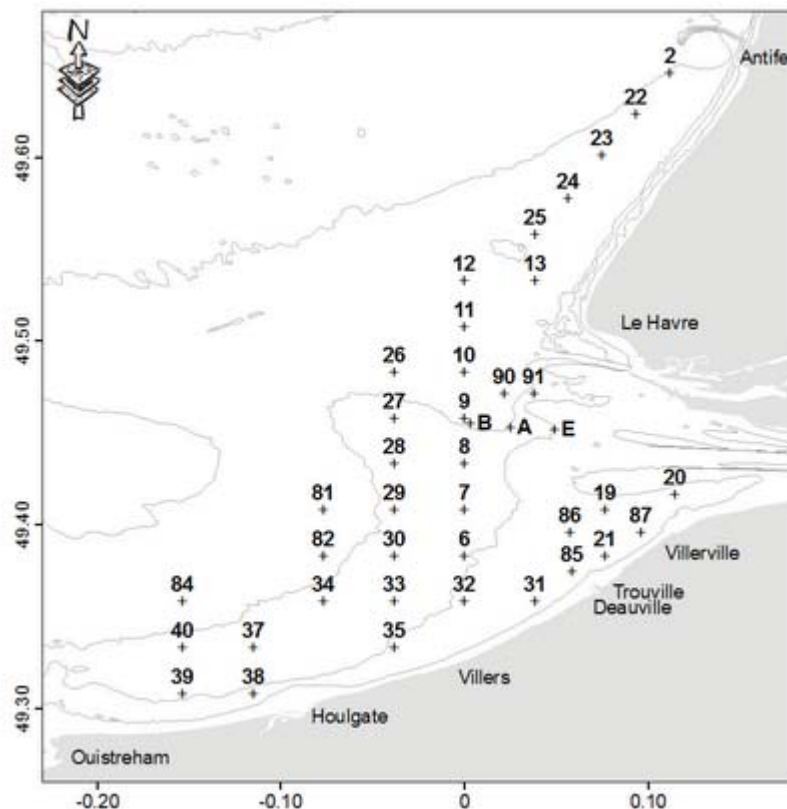


Figure 50 : Carte de localisation des stations échantillonnées dans le cadre du suivi PECTOW. Les points représentent les stations communes aux années 1988-1991-1996-2001-2006.

## II. PRESENTATION DES DONNEES COLMATAGE 2008 ET 2009 ACQUISES AU COURS DE CETTE THESE

### A. STRATEGIE ET DEROULEMENT DES CAMPAGNES EN MER

Il est important de noter que ces campagnes étaient avant tout axées sur la pluridisciplinarité. Elles ont entre autre été motivées par la nécessité d'entreprendre un échantillonnage commun à différentes disciplines pour l'étude conjointe de la macrofaune benthique, de la mégafaune benthique et démersale puis des sédiments. Les points de prélèvements du macrobenthos et des sédiments ont été positionnés sur les points de chalutage relatifs au suivi du peuplement de poissons mené par l'IFREMER. La zone se situe sur le domaine public maritime en aval du confluent de la Risle jusqu'à la partie orientale de la baie de Seine (sonde des 20 m), s'étend d'Ouistreham à Antifer et la période retenue correspond à la fin de l'été (septembre). La Figure 51 représente les grilles d'échantillonnage de la macrofaune benthique et des paramètres sédimentaires associés pour les campagnes COLMATAGE 2008 et 2009.



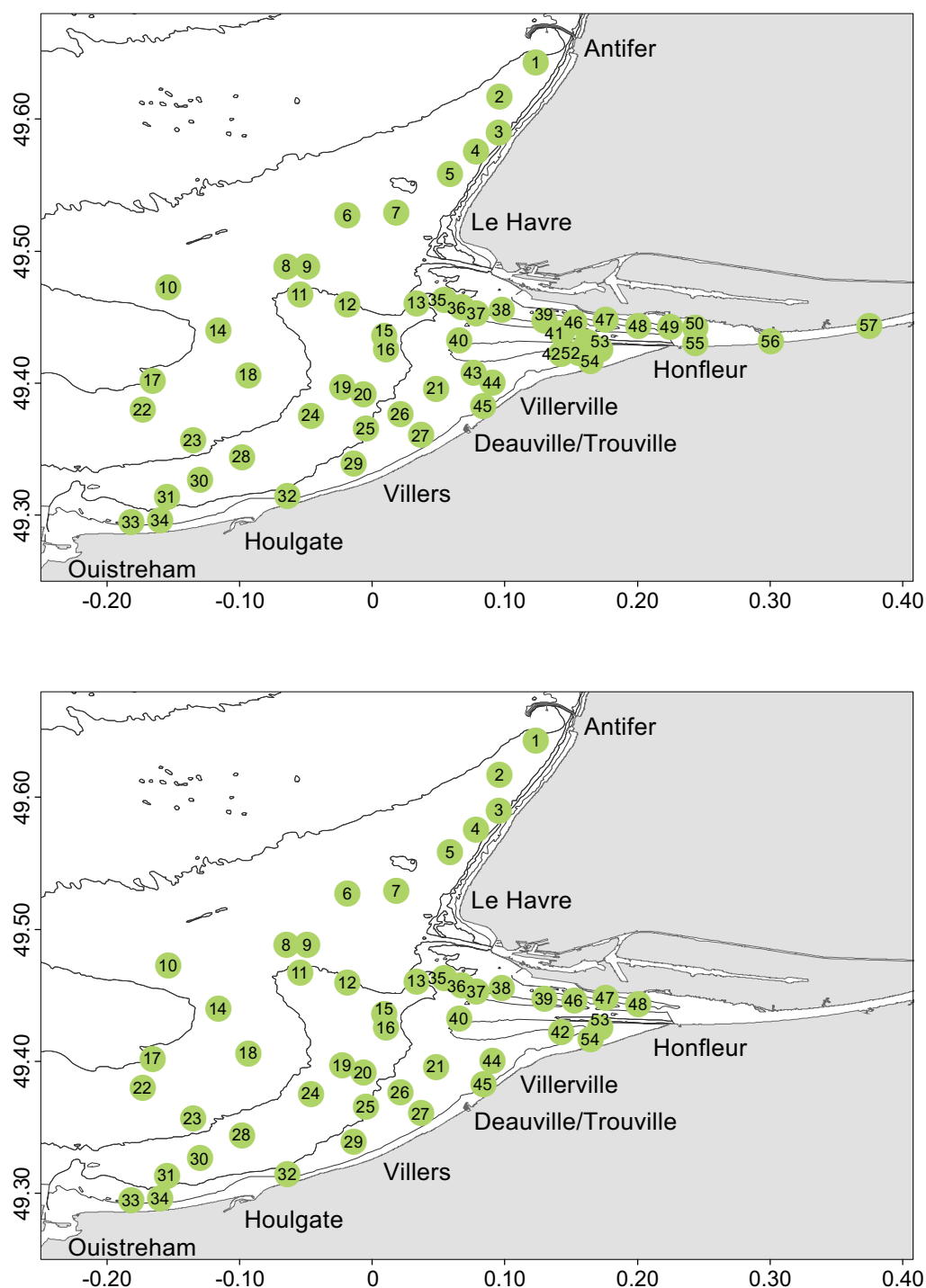


Figure 51 : Cartes des points de prélèvement du macrobenthos subtidal en baie de Seine Orientale dans le cadre du projet COLMATAGE 58 stations en septembre 2008 (haut) et 48 stations en septembre 2009 (bas).

La première campagne COLMATAGE s'est déroulée à l'automne 2008. Vingt stations situées dans l'embouchure et sur les plus faibles profondeurs ont été échantillonnées à bord de Côte d'Aquitaine entre le 21 septembre et le 28 septembre 2008. Les 38 stations restantes ont été échantillonnées à bord du Côtes de la Manche entre le 4 octobre 2008 et le 11 octobre 2008.

La seconde campagne COLMATAGE s'est déroulée à l'automne 2009. Pour cette campagne, les stations du chenal (41, 51, 55, 56, 57 et 58) n'ont pas été revisitées, en raison de leur grande pauvreté faunistique. Le chenal de navigation situé entre les digues submersibles est en effet une zone particulièrement anthropisée notamment par une intense activité de dragage pouvant entraîner la défaunation partielle ou totale du sédiment (Lu & Wu, 2000). Outre ces dragages fréquents, il est également marqué par des courants de marée intenses, en raison de la faible section d'écoulement délimitée par les digues qui engendre une dynamique hydrosédimentaire forte, et est caractérisé par de plus fortes variations de salinité. Il en résulte des conditions hostiles à l'installation durable de la macrofaune et les valeurs de richesse spécifique ainsi que les valeurs d'abondance y sont très faibles voir nulles. D'autre part, deux stations en fond de Fosse Nord (49 et 50) et deux stations en Fosse Sud (52 et 54) n'ont pu être revisitées en raison des trop faibles profondeurs. La station 43 n'a pas été revisitée en 2009.

Ce sont donc au total 48 stations qui ont été échantillonnées à bord du Côtes de la Manche entre le 27 août et le 3 septembre 2009. Parmi les trois stations situées dans les Fosses Nord et Sud qui n'avaient pas pu être échantillonnées durant cette mission, seule la station 54 a pu être revisitée le 27 septembre 2009 lors de la seconde mission allouée aux chalutages entre le 24 septembre et le 1<sup>er</sup> octobre 2009, à bord du SEPIA II. Ces 48 stations sont communes entre les deux années prospectées.

## **B. RECOLTE ET TRAITEMENT DES ECHANTILLONS DEDIES A L'ANALYSE FAUNISTIQUE**

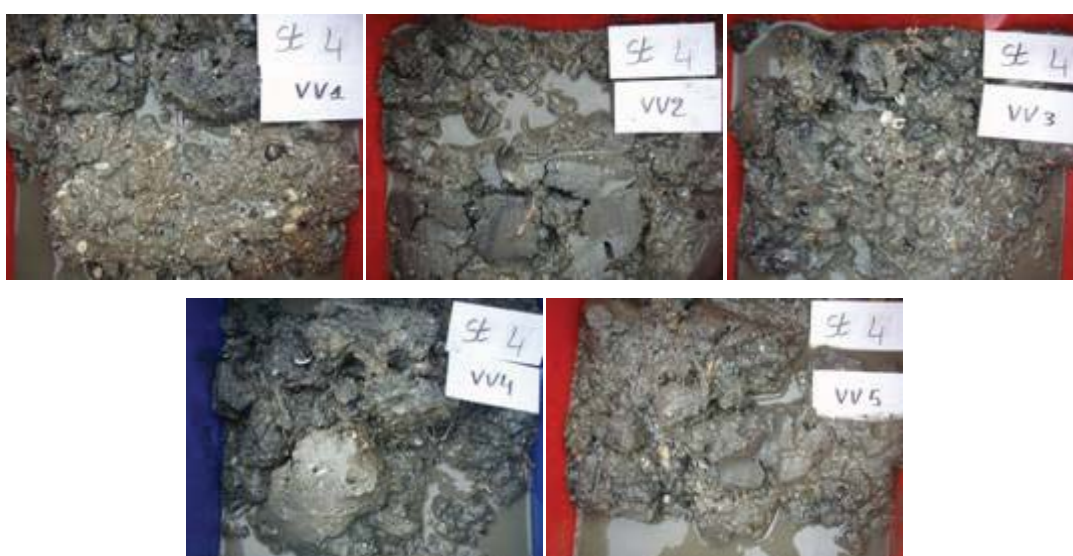
### **1. Travail à bord**

La benne Van Veen échantillonnant 0,1 m<sup>2</sup> de sédiments a été utilisée à raison de cinq réplicats pour l'analyse de la faune (Figure 52). Cette benne, facile à mettre en œuvre, échantillonne très bien l'ensemble biosédimentaire du secteur étudié.



*Figure 52 : Manipulation à bord de la benne Van Veen*

La benne fut tout d'abord armée puis descendue rapidement. Une fois au fond, les coordonnées géographiques en WGS84 DMN (Degrés Minutes Décimales), la profondeur lue au sondeur et l'heure du prélèvement ont été soigneusement notées dans le carnet de mission et ceci pour chaque réplikat effectué. Les bennes qui ont mal fonctionné ont été répertoriées dans le carnet comme prélèvement " nul ". La benne remplie de sédiments a été déposée dans un bac pour y déverser son contenu, et le volume récolté a été estimé puis noté dans le carnet de mission. L'eau surnageant, pouvant contenir les individus de faible densité, a été déversée dans la cuve de tamisage métallique de vide circulaire de 1 mm. Les sédiments ont alors été photographiés avec une plaque portant le numéro de la station et du réplikat (VV1 = Van Veen réplikat 1 pour le premier réplikat, VV2 pour le second...jusqu'à VV5) (Figure 53).



*Figure 53 : Echantillons récoltés par la benne Van Veen pour l'analyse de la faune*

Les sédiments ont été ensuite versés dans la cuve de tri avant d'être lavés et rincés abondamment à l'eau de mer afin d'évacuer les fractions granulométriques et les individus de moins d'un mm (Figure 54). Dans certains cas, les sédiments prélevés étaient de nature vase compacte ou encore boulettes de vase et l'échantillon était très long à rincer. Afin de gagner du temps, les sédiments ont été mélangés dans le bac avec de l'eau de mer avant d'être versés dans la cuve de tri. Il pouvait rester quelques boulettes qui ont été écrasées à la main en prenant soin de ne pas abimer la faune qui pouvait s'y trouver. Les refus de tamis ont ensuite été conditionnés dans des sacs en plastique sur lesquels ont été notés le nom de la campagne, le numéro de station et de réplikat. Une étiquette DYMO a été mise par précaution dans le sac avec ces mêmes informations. Un plastique d'assez bonne qualité a été choisi pour empêcher que des sédiments ou débris coquilliers tranchants ne le percent.



*Figure 54 : Tamisage à bord des échantillons récoltés par la benne Van Veen pour l'analyse de la faune et conditionnement des refus de tamis récoltés par la benne Van Veen pour l'analyse de la faune*

Les échantillons ainsi obtenus ont été fixés à bord dans une solution d'eau de mer à 3% de formaldéhyde neutralisé au di-Sodium Tétraborate. Des gants, lunettes et masques respiratoires étaient à disposition pour l'utilisation du formol. Pour éviter de prolonger l'exposition de l'utilisateur à ce fixateur hautement nocif pour la santé, les cinq échantillons de faune benthique ont été formolés ensemble. Puis les sacs ont été fermés avec une ficelle bien serrée. Les cinq échantillons pour la faune benthique formolés ont été mis dans un pot étanche contenant le nom de la campagne et le numéro de station.

## **2. Travail au laboratoire**

### ***a. Tri***

Chaque échantillon prélevé pour l'analyse de la faune a été rincé abondamment et si possible à l'eau de mer sur un tamis d'une maille inférieure à 1mm puis a été mis dans une bassine (Figure 55). Utiliser de l'eau de mer évite la dégradation de certaines espèces fragiles et facilite ainsi la phase de détermination. Le choix d'un tamis inférieur à 1mm se justifie par le fait que la phase de rinçage peut endommager et casser les individus fragilisés par la fixation au formol. Certaines espèces (appartenant le plus souvent au groupe des polychètes) sont en effet le plus souvent rétractées et devenues cassantes. Un tamis de maille inférieure à 1 mm a permis de récupérer tous les morceaux. Cette phase de rinçage préalable au tri est indispensable pour ne pas être incommodé lors de la phase de tri par les effluves de formol. Là encore le port d'un masque respiratoire et de gants adaptés était obligatoire. De plus, cette étape a été réalisée sous un système d'aspiration de vapeurs toxiques disponible à la Station Marine de Wimereux.



*Figure 55 : Etape de rinçage d'un échantillon formolé (un réplikat) avant le tri*

La première étape du tri s'est réalisée selon la méthode d'agitation/flottaison qui consistait à récolter sur un tamis les individus qui, par leur faible densité, se concentraient dans l'eau surnageant les sédiments. La bassine contenant les sédiments et de l'eau était pour cela remuée pour que les individus piégés dans les sédiments se retrouvent en suspension dans l'eau. Sans attendre leur décantation, l'eau surnageant contenant la faune a été déversée au dessus d'un tamis de maille inférieure à 1mm (Figure 56). Le tamis récoltait alors la plupart de la faune et quelques débris.



*Figure 56 : Méthode d'agitation/flottaison pour extraire des sédiments la majorité de la faune*

L'opération a été répétée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'individus dans la bassine qui se mettent en suspension dans l'eau. Dans le cas où il y avait beaucoup de sédiments dans la bassine après la phase de rinçage, l'échantillon a été fractionné : un peu de sédiment a été prélevé de la bassine et déposé dans une cuvette de tri pour appliquer cette méthode. La technique d'agitation/flottaison décrite ci-dessus a donc été appliquée à chaque cuvette de tri et renouvelée jusqu'à ce la bassine contenant un réplikat soit terminée.



Lorsque cette méthode ne permettait plus la récolte d'individus, un tri direct a été effectué afin de récolter ceux restant dans les sédiments (généralement, les bivalves et gastéropodes). Il est conseillé de réaliser ce tri dans des cuvettes de tri par petites fractions de sédiments. Puis le refus de tamis, contenant la faune en suspension, a été trié à son tour (Figure 57).



*Figure 57 : Tri des sédiments restants (gauche), tri du refus de tamis (droite).*

La faune ainsi extraite a été conditionnée dans des pots en plastique contenant de l'éthanol à 70° pour la conservation en attente de son identification. Une étiquette en papier calque sur laquelle est écrit au crayon à papier le nom de la campagne, le numéro de station et de réplikat a été mise dans chaque pot contenant les individus triés. Puis ces pots ont été mis ensemble dans un sac plastique étanche identifié. Le travail de tri se faisant réplikat par réplikat, on a obtenu un sac par réplikat échantillonné (Figure 58).



*Figure 58 : Conditionnement de la faune extraite des sédiments*

Il est parfois d'usage d'utiliser le rose Bengale pour colorer la faune et faciliter son repérage. Pour ma part, je trouve que la faune se reconnaît assez bien et que cette technique n'est pas utile

et complique son identification. Certaines stations étant trop volumineuses et trop riche en petits individus, le temps de tri du refus de tamis était estimé trop long. La solution consistait à récupérer les plus gros, enlever la majorité des déchets et mettre le reste du refus de tamis (petits individus et petits débris) dans un pot à part avec beaucoup d'éthanol à 70%. Le tri de cette fraction riche en petits éléments était plus aisé sous loupe binoculaire, cela fatiguait moins les yeux et faisait gagner du temps.

### ***b. Détermination et comptages***

Les déterminations et comptages ont été réalisés sous loupe binoculaire (Figure 59) et à l'aide d'un microscope jusqu'au niveau taxonomique le plus élevé (spécifique chaque fois que cela était possible). Il arrivait souvent que des individus soient cassés en deux ou plusieurs morceaux. Dans ce cas, seules les têtes ont été comptabilisées. Une collection de référence regroupant tous les taxons rencontrés a été établie. Pour chaque taxon conservé, une étiquette portant le nom de la campagne, l'année d'échantillonnage, le nom du taxon, le numéro de station et le numéro de réplicat a été associée. Les nématodes et oligochètes n'ont pas été pris en compte. Certains groupes comme les Syllidae, Nemertes n'ont pas été identifiés jusqu'à l'espèce. Néanmoins, les Syllidae ont été conservés au sein de la collection de référence au cas où il s'avèrerait utile de revenir à leur identification jusqu'à l'espèce.



*Figure 59 : Plan de travail pour l'identification de la faune*

Pour des raisons de gain de temps, seuls quatre réplicats ont été déterminés pour la campagne 2009 alors que les cinq réplicats échantillonnés en 2008 ont été analysés. D'autre part, l'encadrement d'un stagiaire de M1 (Boinet, 2010) a permis de montrer, sur la base des données COLMATAGE 2008, que l'ajout d'un cinquième réplicat n'apportait que peu d'informations supplémentaires en terme spécifique. Les échantillons des cinquième réplicats de la campagne 2009 ont été néanmoins conservés pour être éventuellement déterminés ultérieurement. Une collection de référence a été établie. De nombreuses espèces sont conservées dans l'alcool dans

des piluliers en verre avec le nom de l'espèce identifiée, le nom de la campagne ainsi que les numéros de station et de réplikat.

### c. Biométrie

Des mesures ont été faites sur quelques espèces dominantes de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni*, échantillonnées lors des campagnes Colmatage 2008 et 2009. Le choix des mesures à réaliser s'est basé sur des études de biométrie antérieures. La Figure 60 représente les mesures prises sur les individus ainsi que les sources d'études antérieures ayant procédé de la même façon.

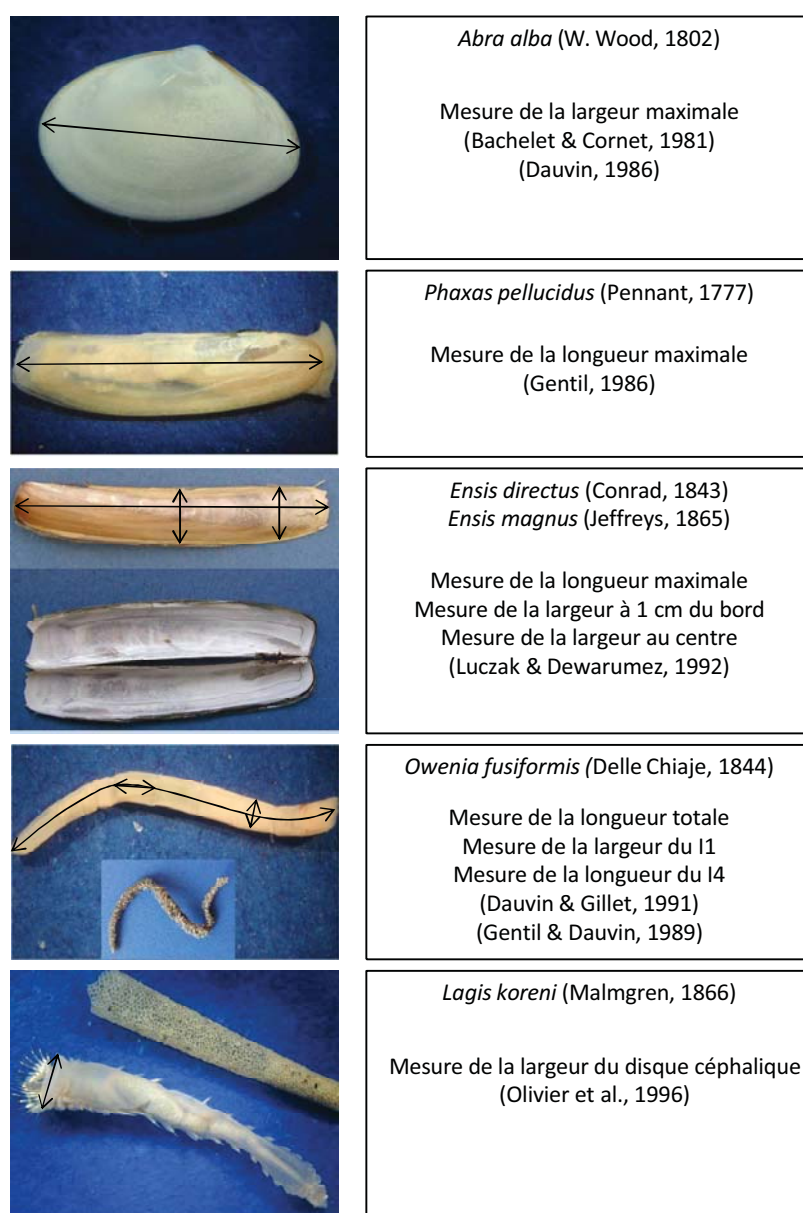


Figure 60 : Mesures prises sur quelques espèces abondantes (*Abra alba*, *Phaxas pellucidus*, *Ensis directus*, *Ensis magnus*, *Owenia fusiformis* et *Pectinaria koreni*) de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* pour les campagnes COLMATAGE 2008 et 2009. Les flèches figurant sur les photos des espèces représentent la mesure effectuée.

#### d. Biomasses

Les biomasses de chaque espèce recensée ont été évaluées par la détermination du Poids Sec Libre de Cendre (PSLC) pour l'année 2008 uniquement (Figure 70). Les individus emballés dans du papier aluminium ont été séchés à l'étuve à 60 °C durant 48 h pour les petits individus et 72 h pour les plus grands. Les poids secs ont été mesurés à la sortie de l'étuve, après refroidissement, sur une balance de précision à 0,01 mg, Sartorius research modèle R160 P×F1. Une seconde pesée a été effectuée après calcination à 550 °C durant 6 h pour obtenir le poids de cendres. La différence entre les deux pesées a donné le PSLC. Les PSLC ont été obtenus en regroupant les individus de chaque espèce et ceci pour chaque réplicat. Cette partie du travail étant lourde en temps, il a été convenu de ne pas le faire pour l'année 2009. Pour améliorer ce protocole, l'utilisation d'un dessiccateur sous vide serait souhaitable pour limiter la possible réhydratation des individus durant la phase de refroidissement.

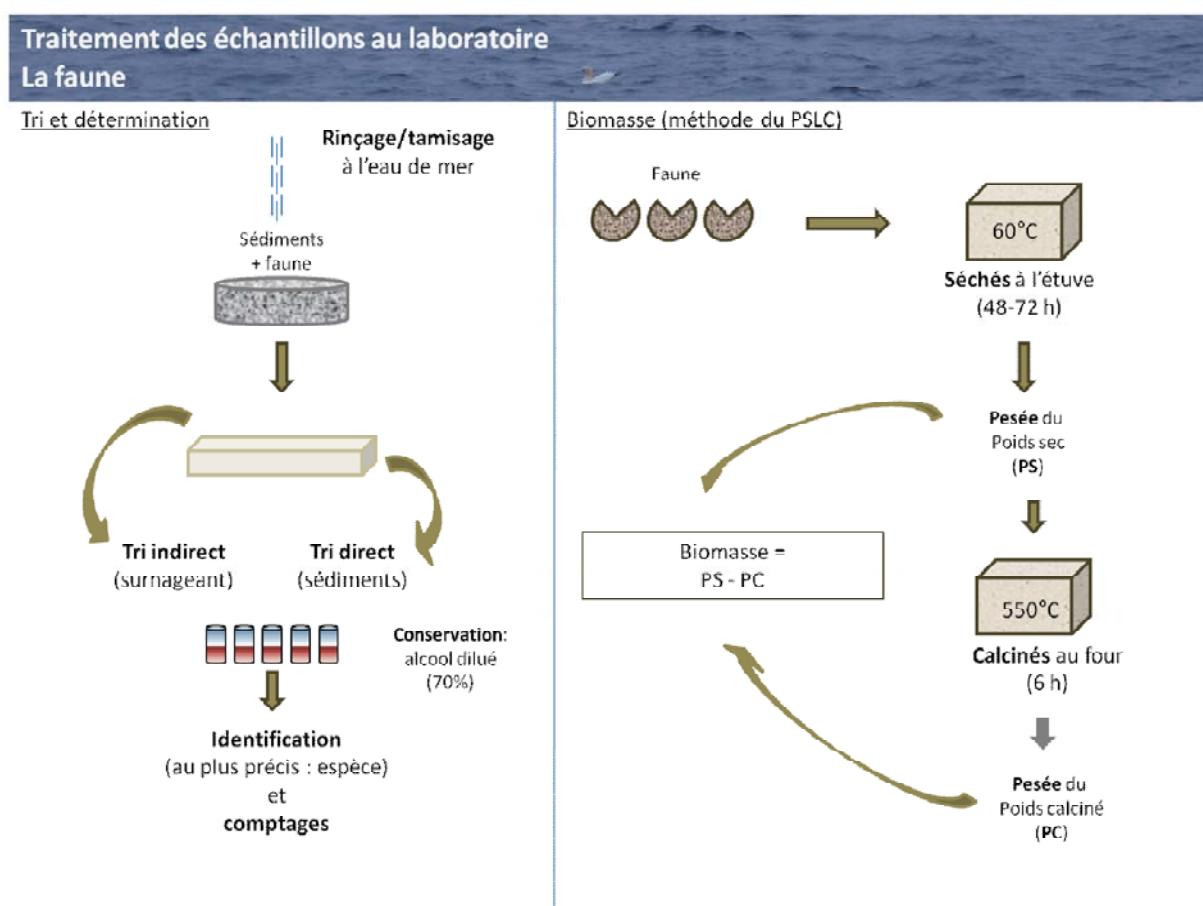


Figure 70 : Récapitulatif des étapes de tri et de biomasses

D'autres estimations de biomasses ont été réalisées sur quelques espèces abondantes. Cela concerne les mollusques bivalves *Ensis directus*, *Ensis magnus*, *Abra alba* et *Phaxas pellucidus* ainsi que les annélides polychètes *Owenia fusiformis* et *Pectinaria koreni* sur lesquelles des mesures ont été réalisées. Après regroupement des individus entiers et en bon état de conservation par classes de tailles, les biomasses (suivant le protocole décrit précédemment) ont été estimées pour chacune d'entre elles. Des relations allométriques ont pu être établies autorisant ainsi une meilleure estimation des biomasses compte tenu du nombre parfois important d'individus cassés dans les échantillons. Les courbes allométriques représentant les mesures de biomasses par classes de taille des individus chez *Abra alba*, *Ensis directus*, *Ensis magnus*, *Pectinaria koreni*, *Owenia fusiformis*, récoltés lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009 figurent en Annexe 3.

Ce travail d'estimation des biomasses par classe de tailles n'a été réalisé que pour l'année 2008. Le Tableau 3 représente les différentes classes de taille prises en compte pour chaque espèce étudiée.

Tableau 3 : Classes de taille prises en compte pour chaque individu mesuré pour quelques espèces dominantes des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009.

Taxon	Critère allométrique	Classes de tailles retenues
<i>Abra alba</i>	Largeur maximale	Tous les 1 mm
<i>Phaxas pellucidus</i>	Longueur maximale	Tous les 1 mm
<i>Ensis directus</i>	Longueur maximale	Tous les 2 mm
<i>Ensis arcuatus</i>	Longueur maximale	Tous les 2 mm
<i>Owenia fusiformis</i>	Longueur du l4	Tous les 0,4 mm
<i>Lagis koreni</i>	Diamètre du disque céphalique	Tous les 0,5 mm

## C. RECOLTE ET TRAITEMENT DES ECHANTILLONS DEDIES A L'ANALYSE SEDIMENTAIRE ASSOCIEE

### 1. Travail à bord

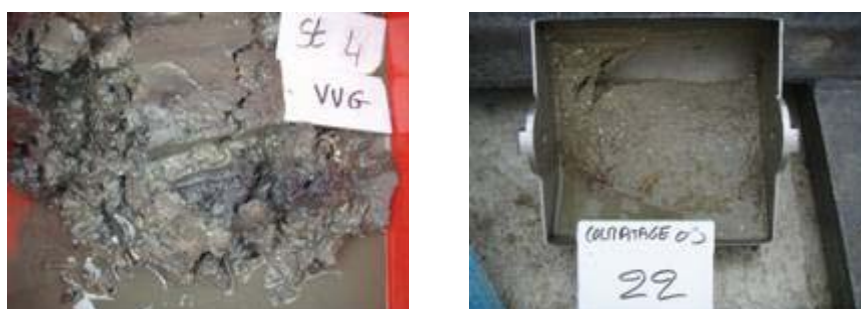
La benne Van Veen échantillonnant 0,1 m<sup>2</sup> de sédiments a été utilisée à raison d'un réplicat pour l'analyse granulométrique. La benne Shipeck échantillonnant 0,04 m<sup>2</sup> de sédiments superficiels a été utilisée à raison d'un réplicat pour la Matière Organique (Figure 80). Largement utilisée par les sédimentologues, l'avantage de cette benne est de mieux conserver la couche de sédiments superficiels. En raison du caractère pluridisciplinaire de ces campagnes, il a été décidé que dans cette benne Shipeck, un sous-échantillon de sédiment superficiel serait prélevé afin d'en réaliser une analyse granulométrique.



*Figure 80 : Benne Shipeck*

Comme pour les répliquats de faune, à chaque prélèvement à la benne (Van Veen et Shipeck), les coordonnées géographiques en WGS84 DMN, la profondeur lue au sondeur et l'heure du prélèvement ont soigneusement été notées dans le carnet de mission. Le volume de sédiment récolté à la benne Van Veen pour analyse granulométrique a été estimé et noté dans le carnet de mission. Les bennes qui ont mal fonctionné ont été répertoriées dans le carnet comme prélèvements "nul".

Tous les sédiments récoltés à la benne Van Veen et à la benne Shipeck ont été photographiés avec une plaque portant le numéro de la station (Figure 81).



*Figure 81 : Echantillons récoltés à la benne Van Veen pour analyse granulométrique (gauche) et à la benne Shipeck pour analyse de la teneur en Matière Organique dans les sédiments de surface (droite).*

Entre 500 g et 1 kg de sédiments ont été prélevés dans la caisse contenant les sédiments échantillonnés à la benne Van Veen (le but étant d'avoir un échantillon le plus représentatif possible, plus les sédiments montraient une hétérogénéité, plus le volume prélevé était grand) et conditionnés dans un sac plastique identifié (sur le sac et par une étiquette DYMO à l'intérieur). Environ 100 g de sédiments ont été prélevés directement dans la Shipeck (le but étant d'avoir un échantillon le plus représentatif possible du taux de Matière Organique contenus dans les



sédiments superficiels) et conditionnés dans un pot en plastique identifié (sur le pot et par une étiquette DYMO à l'intérieur). Un échantillon d'environ 10 g de sédiments superficiels a été prélevé dans cette benne Shipeck pour analyse granulométrique. Les sédiments récoltés à la benne Van Veen pour l'étude granulométrique par tamisage et ceux prélevés à la benne Shipeck pour l'estimation de la teneur en Matière Organique ont été congelés à -20 °C à bord et conservés congelés une fois ramenés au laboratoire.

## 2. Travail au laboratoire

### a. Granulométrie

#### i. Granulométrie par tamisage sur les échantillons prélevés à la benne Van Veen

Au laboratoire, une analyse granulométrique a été effectuée sur les sédiments prélevés à la benne Van Veen (Figure 82).

Les sédiments ont tout d'abord été rincés à l'eau douce au travers d'un tamis de 50  $\mu\text{m}$  (jusqu'à ce que l'eau filtrée soit claire), pour éviter la formation d'une croûte de sel et d'agrégats de grains de sable lors de la phase de séchage. Cette première étape a en outre permis de séparer de l'échantillon complet les sédiments les plus fins (< 50  $\mu\text{m}$ ) qui peuvent également former une croûte durant la phase de séchage.

Après une phase de décantation et extraction du surplus d'eau, les deux fractions de sédiments ont été mises à sécher séparément à l'étuve à 100 °C durant au moins 48 h.

Les sédiments bien secs de la fraction la plus grossière ont été tamisés sur une colonne vibrante (RETSCH type AS200) munie de 18 tamis de mailles carrées de norme AFNOR. Le Tableau 4 présente les différentes fractions granulométriques prises en compte dans cette analyse, la fraction inférieure à 50  $\mu\text{m}$  a été récupérée en bas de la colonne de tamisage.

*Tableau 4 : Fractions granulométriques exprimées en  $\mu\text{m}$  utilisées pour le traitement des échantillons de sédiments prélevés à la benne Van Veen. Ces fractions correspondent aux 18 tamis de mailles carrées de norme AFNOR, la fraction inférieure à 50  $\mu\text{m}$  a été récupérée en bas de la colonne de tamisage.*

Fractions granulométriques (en $\mu\text{m}$ )		
[5000-10000)	[630-800)	[160-200)
[2000-5000)	[500-630)	[125-160)
[1600-2000)	[400-500)	[100-125)
[1250-1600)	[315-400)	[80-100)
[1000-1250)	[250-315)	[63-80)
[800-1000)	[200-250)	[50-63)

La durée de l'opération était de 10 min pour les fractions supérieures à 800  $\mu\text{m}$  et de 20 min pour les autres plus fines. Chaque refus de tamis et la fraction de sédiment la plus fine ( $< 50 \mu\text{m}$ ) ont été pesés sur une balance de précision de 0,01 g (Sartorius type 1507). Les résultats de cette analyse granulométrique par tamisage sont usuellement exprimés en pourcentages pondéraux respectifs des différentes classes de tailles de grains.

## *ii. Granulométrie Laser sur les échantillons prélevés à la benne Shipeck*

Les analyses granulométriques des échantillons prélevés à la benne Shipeck ont été effectuées à l'aide d'un Micro-granulomètre laser Coulter LS 230 qui permet d'étudier les tailles de grains comprises entre 0,04  $\mu\text{m}$  et 2 mm (avec un module PIDS).

L'analyse granulométrique Laser repose sur la mesure de l'angle de diffraction de la lumière qui éclaire chaque particule sédimentaire. Plus l'angle de diffraction est grand, plus la particule éclairée est petite. L'analyse étant réalisée en voie humide, l'eau est utilisée comme diluant de l'échantillon et une étape préliminaire consiste à mesurer le bruit de fond de l'eau qui, comme tout diluant, provoque un phénomène de diffraction. Environ 2 g de sédiments et quelques secondes suffisent à analyser un échantillon.

Afin de juger de la qualité de la mesure, et surtout de sa représentativité, le protocole de mesure au Laser se base avant tout sur une description de l'échantillon complémentaire à celle réalisée lors de l'échantillonnage. Si l'échantillon comporte des graviers ou des grosses coquilles, cela implique une mesure au tamis et son analyse granulométrique per Laser est abandonnée. Les mesures au laser étant rapides, plusieurs mesures (3 ou 4) peuvent être réalisées à partir de sous-échantillonnages dans la benne. Néanmoins, ce choix se fait en fonction des sédiments prélevés. En effet, si l'analyse des sédiments sableux ne pose généralement pas de problème de réplicabilité, ce n'est pas le cas des sédiments vaseux qui peuvent être lités. Ce problème est d'ailleurs résolu lors de l'échantillonnage à bord des bateaux puisque plusieurs prélèvements des différentes fractions sédimentaires sont réalisés dans la benne.

Le séchage ou la congélation induisant l'agglomération de particules, les échantillons doivent rester "frais". Les sédiments compactés sont dispersés au préalable dans un bêcher au moyen d'un agitateur magnétique.

Le sédiment à analyser est versé dans l'appareil sur un tamis de 2 mm, ce qui permet à la fois (i) une protection de la pompe du laser en cas de présence de gros débris et (ii) de juger de la présence de graviers, ce qui nécessiterait une mesure par tamisage.

Les préconisations "constructeur" doivent être respectées : alignement correct du laser, blanc entrant dans les normes optiques, concentration optique optimales, temps correct de mesure, modèle optique judicieux, exportation des données extrapolées correctement.

Enfin, la courbe granulométrique obtenue est aussitôt analysée, afin de rendre compte de la qualité de la mesure (notamment afin de juger si l'analyse est représentative du descriptif de l'échantillon). Si la courbe n'est pas "fermée" (*ie* si les valeurs ne sont pas égales à 0 pour les valeurs de taille de 2 mm), une analyse au tamis est réalisée. La courbe peut également présenter des anomalies qui impliqueraient la réalisation d'un réplicat supplémentaire. (Lesourd, com. pers).

### ***b. Matière Organique (MO)***

Pour l'analyse de la MO, la méthode de perte au feu a été retenue (Luczak et *al.*, 1997) et trois réplicats contenant environ 10 g de sédiments ont été réalisés pour chaque station (Figure 82). Les échantillons ont été séchés à l'étuve à 60°C durant 72 h puis enfournés à 500°C durant 6 h. Trois pesées ont été effectuées pour chaque échantillon :

La teneur en MO exprimée en pourcentage de la masse de sédiment sec est calculée par la formule :

$$\text{Teneur en MO} = \frac{(PS - PV) - (PC - PV)}{(PS - PV)} \times 100$$

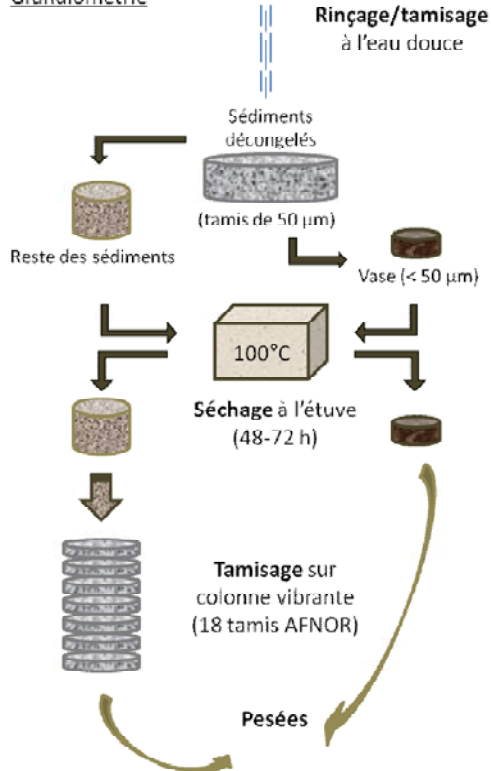
Pesée de la capsule en aluminium vide : poids vide (PV)

Pesée à la sortie de l'étuve de l'ensemble capsule et sédiments : poids sec (PS)

Pesée à la sortie du four de cet ensemble capsule et sédiment : poids calciné (PC)

## Traitement des échantillons au laboratoire Les sédiments

### Granulométrie



### Matière Organique (MO)

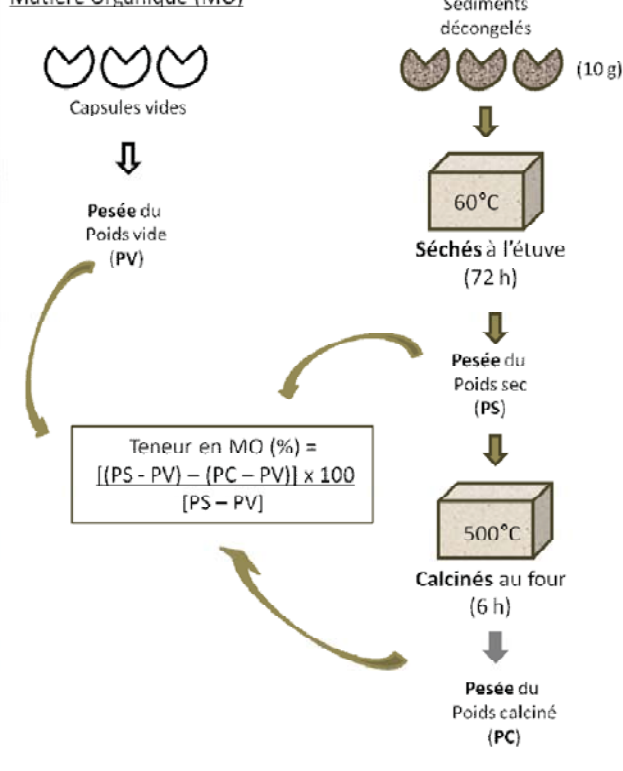


Figure 82 : Récapitulatif des étapes d'analyse granulométrique par tamisage et de la Matière Organique par perte au feu.

## D. LES DONNEES FAUNE-SEDIMENT EXPLOITEES DANS CETTE ETUDE

Bien que les données relatives aux cinquième répliquats dédiés à l'analyse faunistique en 2008 soient disponibles, il a été choisi de ne traiter que quatre répliquats en 2008 pour faciliter les comparaisons avec l'année 2009 pour laquelle seuls quatre répliquats ont été déterminés afin de réduire le temps de travail au laboratoire.

C'est sur la base des 48 stations communes aux deux années échantillonnées et sur la prise en compte de quatre répliquats pour la macrofaune benthique et d'un répliquat pour la granulométrie des sédiments que les résultats seront présentés. Ces 48 stations sont celles échantillonnées en 2009. Les données issues des analyses granulométriques Laser réalisées à partir des échantillons prélevés à la benne Shipeck seront également utilisées.

# **CHAPITRE 3 : ETAT DES LIEUX (2008-2009) DU COMPARTIMENT BENTHIQUE (MACROFAUNE ET SEDIMENTS) DU SYSTEME "BAIE DE SEINE ORIENTALE – EMBOUCHURE" ET CHANGEMENTS A LONG TERME (1988-2009)**

## **I. CARACTERISTIQUES ET ORGANISATION HYDRO-MORPHO-SEDIMENTAIRE DANS LE CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE ET ANTHROPIQUE DU SYSTEME, PROBLEMATIQUE DE LA STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE DANS L'ETUDE DES RELATIONS MACROFAUNE BENTHIQUE – SEDIMENTS.**


Deux méthodologies ont été utilisées dans le cadre des missions COLMATAGE pour l'étude de la granulométrie des sédiments. La première a consisté au prélèvement à la benne Van Veen des sédiments qui ont été tamisés au travers de 18 tamis de mailles carrées, et la seconde a consisté au prélèvement à la benne Shipeck des sédiments dont la granulométrie a été définie selon la méthode Laser sur les particules inférieures à 2 mm. Cette méthode ne couvrant pas le même spectre de taille que la méthode par tamisage, une analyse complémentaire est effectuée en utilisant des tamis dans le cas où les échantillons comportaient une fraction de sédiment grossiers supérieure à 2 mm, ce qui se traduit par une courbe de granulométrie Laser "non fermée" sur les tailles de grain les plus importantes (Lesourd, comm. pers.). Seuls deux échantillons ont été concernés par ce protocole. La benne Shipeck conservant mieux la distribution verticale des sédiments, cela revient à décrire principalement la nature des sédiments superficiels. Utiliser la benne Van Veen, conservant moins bien cette stratification et prélevant sur une plus grande profondeur, revient à étudier plus spécifiquement l'habitat sédimentaire.

Les cartes de distribution des différentes classes granulométriques présentées ici sont les résultats des prélèvements réalisés à la benne Van Veen. Ce choix se justifie par rapport aux comparaisons possibles avec les études antérieures reposant sur l'étude des relations entre la faune et les sédiments. En effet, la faune pouvant vivre en surface ou encore enfouie plus ou moins profondément dans les sédiments, la benne Van Veen, la benne Hamon ou encore la benne Smith Mc Intyre ont souvent été choisies pour réaliser ces prélèvements. Ces engins sont mieux adaptés que la benne Shipeck à l'étude quantitative de la macrofaune benthique. La benne Van Veen est d'ailleurs préconisée pour le suivi des habitats et biocénoses benthiques des substrats meubles côtiers dans le cadre du REBENT (REseau de suivi des biocénoses BENTHiques)

développé actuellement en Bretagne et prolongé ailleurs dans le cadre de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau) pour l'étude des invertébrés benthiques.

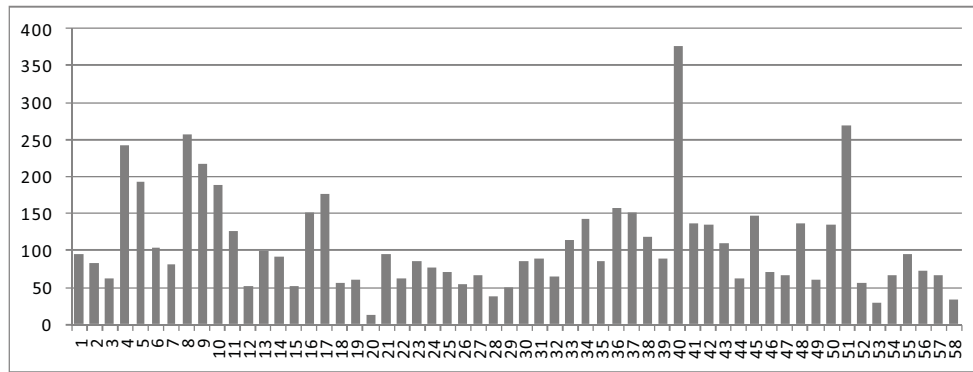
Cependant, l'allure des courbes cumulées des pourcentages pondéraux des fractions granulométriques obtenues à partir des échantillons à la benne Van Veen ont été comparés à celles obtenues par méthode Laser suite aux prélèvements réalisés à la benne Shipeck pour l'année 2008. Un des objectifs était de savoir si la vision que peut avoir le sédimentologue des fonds sédimentaires est comparable et conforme à celle que peut avoir le benthologue. Cette comparaison a en outre été motivée par la volonté d'apporter de nouvelles informations concernant la structuration des fonds sédimentaires du secteur et de discuter de la complémentarité de ces deux approches.

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 devait permettre 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. Notre participation aux campagnes de prélèvement en mer a en effet permis de se rendre compte de la grande hétérogénéité parfois rencontrée dans certaines zones prospectées. 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 nous ne devions pas tenir compte de la dérive du bateau au cours de l'échantillonnage. En effet, la distance maximale observée entre le premier réplikat (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 (Figure 83).



2008



2009

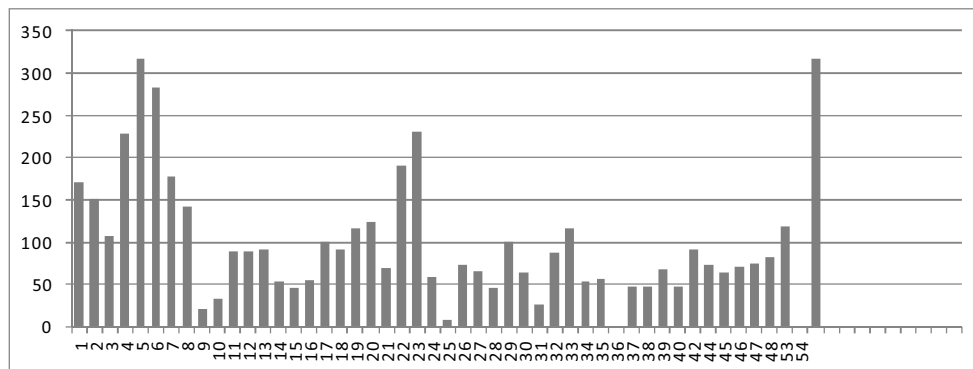


Figure 83 : Histogramme des distances maximales entre le premier réplikat et les cinq autres prélevés dans le cadre des campagnes COLMATAGE 2008 (haut) et 2009 (bas).

✎ D'autre part, nous avons également 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 permettait 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 cette 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.

## **A. BATHYMETRIE**

La Figure 84 représente la distribution des profondeurs corrigées pour chaque campagne en 2008 et en 2009 au sein du secteur étudié. Les profondeurs ont été corrigées en tenant compte de la hauteur d'eau à une heure donnée (donnée fournie sur le site du SHOM) et en fonction de la position de la sonde de chaque navire.

En 2008, les points échantillonnés caractérisés par les plus faibles profondeurs (0-1 m) sont situées dans l'embouchure en amont de la Fosse Nord et en amont de la Fosse Sud, au niveau des bancs de sables longitudinaux séparant les trois principaux chenaux de navigation, et très près de la côte, à proximité d'Ouistreham et de Houlgate. Les stations dont les profondeurs sont comprises entre 2 et 3 m sont principalement situées en partie aval des Fosses Nord et Sud, le long des Bancs d'Amfard et des Ratelets, puis à proximité de la côte devant Deauville. Les stations dont les profondeurs se situent entre 4 et 5 m sont localisées face à Deauville puis plus près des côtes en face de Villers. Les fonds compris entre 5 à 10 m constituent une zone intermédiaire le long d'un axe partant du large d'Ouistreham jusqu'en face de l'embouchure. Les stations échantillonnées dans les plus grandes profondeurs (10-20 m) sont situées au large de la baie de Seine Sud-orientale, au large de l'embouchure, et à proximité des côtes du pays de Caux entre Le Havre et Antifer. Nous pouvons remarquer qu'en 2008, le chenal de navigation qui est entretenu régulièrement par dragage se caractérise par des profondeurs d'environ 5 m, sauf pour la station 51 qui se distingue par une profondeur de 8 m.

En 2009, la situation est sensiblement la même qu'en 2008. Seules quelques stations montrent un changement mais qui ne va pas au-delà de deux mètres. Il est difficile de conclure à une érosion ou à une accumulation de sédiments à ces sites, cela pourrait être attribué à la précision du sondeur, à la dérive du bateau, aux conditions de houle ou encore à la présence de mégarides sur ces fonds comme déjà constaté entre Ouistreham et Deauville (Garnaud, 2003).

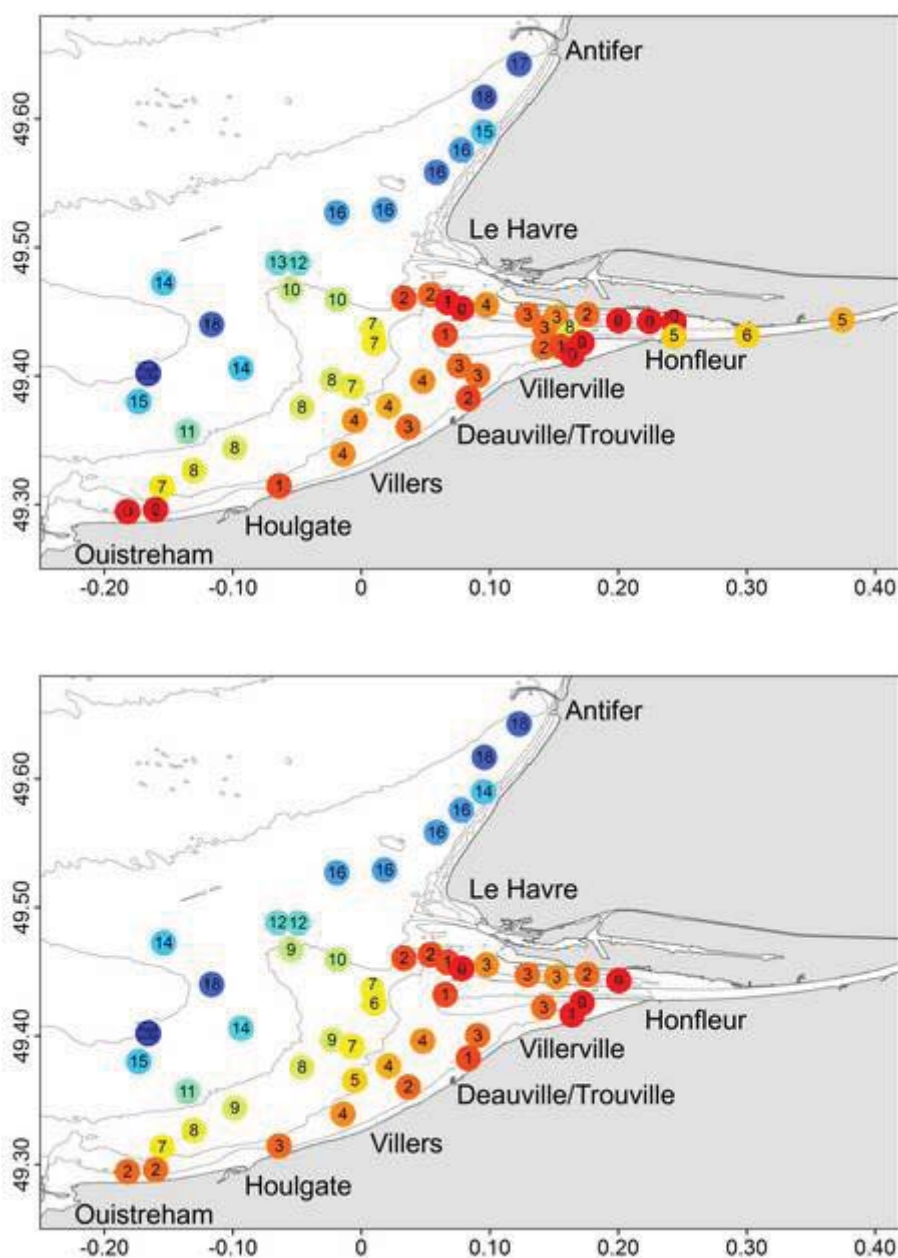


Figure 84 : Cartes de la bathymétrie en baie de Seine Orientale à partir des données des campagnes automnales COLMATAGE 2008 (haut) et 2009 (bas). Les valeurs correspondent aux profondeurs lues au sondeur et corrigées de la marée. En fond de carte figure la bathymétrie du SHOM 1997.

La comparaison des cartes de distribution des profondeurs corrigées pour les deux campagnes ne montre pas de changements significatifs. Ces cartes peuvent être vues comme une actualisation de la profondeur dans le secteur et nous pouvons comparer les profondeurs obtenues avec la bathymétrie du SHOM datant de 1997 représentée en fond de carte. La profondeur actuelle correspond très bien à celle de 1997 sauf pour une zone située à la sortie de la Fosse Nord. Cette différence est à relier à une remontée des fonds due à la progradation de

l'estuaire vers l'aval et au comblement progressif lié aux rejets de dragage du GPMR sur le site du Kannick.

## B. CARACTERISTIQUES EDAPHIQUES

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

#### a. Regroupement des fractions sédimentaires en classes granulométriques majeures

Pour simplifier les données des analyses granulométriques, les différentes fractions sédimentaires disponibles ont été regroupées selon les classes figurant Tableau 5. Ces classes sont celles utilisées dans Lesourd (2000).

Tableau 5 : Classes granulométriques prises en compte dans l'analyse et l'interprétation des données sédimentaires (norme AFNOR).

Classes granulométriques (en $\mu\text{m}$ )	
< 50	Fines
[50-63]	
[63-200]	Sables fins
[200-500]	Sables moyens
[500-2000]	Sables grossiers
>2000	Graviers

#### b. Distribution spatiale des différentes classes granulométriques obtenues à l'issue des prélèvements réalisés à la benne Van Veen

##### i. Distribution des fines

∩ Situation actuelle : campagnes COLMATAGE

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 85).

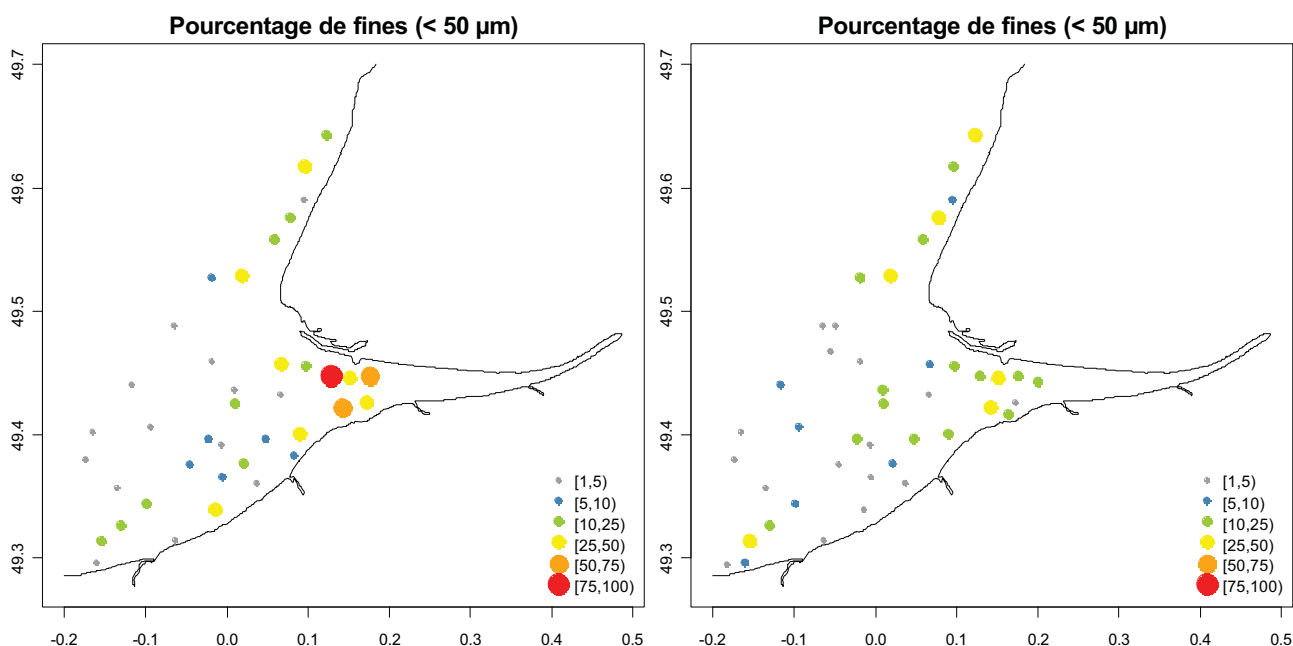


Figure 85 : Distribution spatiale des particules fines (< 50 µm) dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite). Les classes sont exprimées en pourcentage.

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) (Figure 25), et au résultat de la modélisation des zones préférentielles de dépôts de particules fines liés aux apports de la Seine effectuée par Cugier (1999) (Figure 26). 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.

#### *¶ Choix de la coupure granulométrique de la fraction fine*

Les fines ont parfois été considérées comme des particules sédimentaires de taille inférieure à 63  $\mu\text{m}$ . Le choix de prendre en considération la coupure granulométrique à 50  $\mu\text{m}$ , n'affecte pas ici les résultats :

 D'une part, le fait d'utiliser l'une ou l'autre de ces coupures induit des différences négligeables dans les calculs de teneurs en fines dans les sédiments. Les quelques différences peuvent avant tout être imputées à l'échantillonnage (ou le sous-échantillonnage) ou encore aux incertitudes de mesures considérées ici comme négligeables (les 13  $\mu\text{m}$  séparant les deux coupures représentent 0.65% de la gamme de mesure). Il n'y a donc pas de différences majeures à considérer l'une ou l'autre de ces coupures malgré les débats actuels sur la question (Lesourd comm. pers.).

 D'autre part, pour s'en assurer, les cartes de distribution des fines inférieure à 63  $\mu\text{m}$  concernant les stations prélevées à la benne Van Veen lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009 ont été réalisées. Ne montrant pas de différences avec les distributions observées ci-dessus à partir du pourcentage de fines inférieure à 50  $\mu\text{m}$ , conformément à ce qui était présagé, elles ne sont pas présentées ici.

#### *¶ Evolution à long terme : campagnes PECTOW*

Les cartes de distribution des vases (< 63  $\mu\text{m}$ ) réalisées à partir des campagnes PECTOW sont présentées en Annexe 8 et montrent les mêmes tendances spatiales. Les spots sont toujours localisés préférentiellement aux mêmes endroits : embouchure, baie de Seine Nord-orientale, au large de Deauville puis au nord-est d'Ouistreham. Des dépôts apparaissent parfois en face de Villers avec une variabilité inter-annuelle plus marquée. Une tendance à l'envasement n'est pas observée de façon continue et croissante au cours du temps. Nous pouvons cependant remarquer la particularité de l'année 2006, marquée dans son ensemble par des teneurs en vases dans les sédiments plus élevées que pour les autres années. En tenant compte des années 2008 et 2009, nous observons des teneurs en vases qui se rapprochent dans l'ensemble de l'année 2006, témoignant ainsi d'une possible tendance à l'envasement en baie de Seine Orientale. La



persistance de l'envasement est d'ailleurs plus marquée le long des côtes du Pays de Caux entre le Havre et Antifer.

### *ii. Teneur en Matière Organique dans les sédiments superficiels*

Les cartes de distribution des teneurs en Matière Organique dans les sédiments estimées par la méthode de perte au feu sont présentées Figure 86.

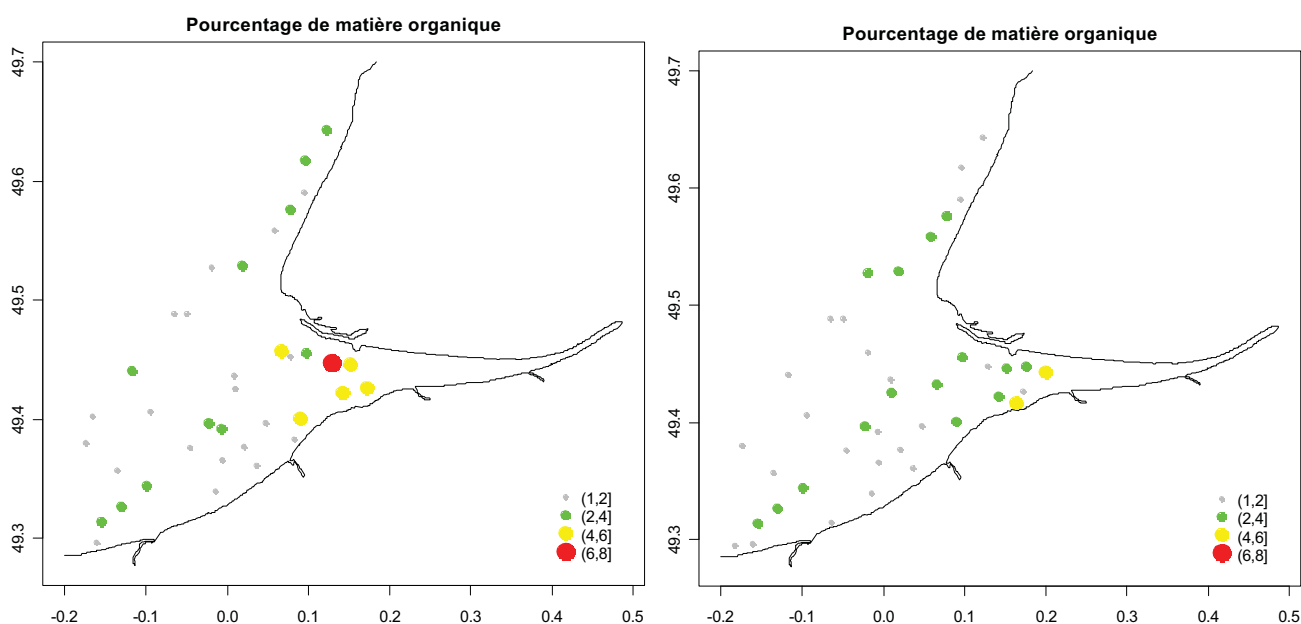


Figure 86 : Distribution spatiale des pourcentages de Matière Organique dans les sédiments superficiels des fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite).

Elles montrent sensiblement la même répartition spatiale que les pourcentages de fines supérieurs à 10 % avec des valeurs plus élevées au sein de l'embouchure par rapport aux stations les plus éloignées au large. Nous pouvons remarquer qu'elles sont plus élevées à l'embouchure en 2008 (4 à 8 %) qu'en 2009 (2 à 4 %) alors que la situation se montre plus stable ailleurs (2 à 4 %).

### *iii. Distribution des sables fins*

∞ Situation actuelle : 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 µm (Figure 87).

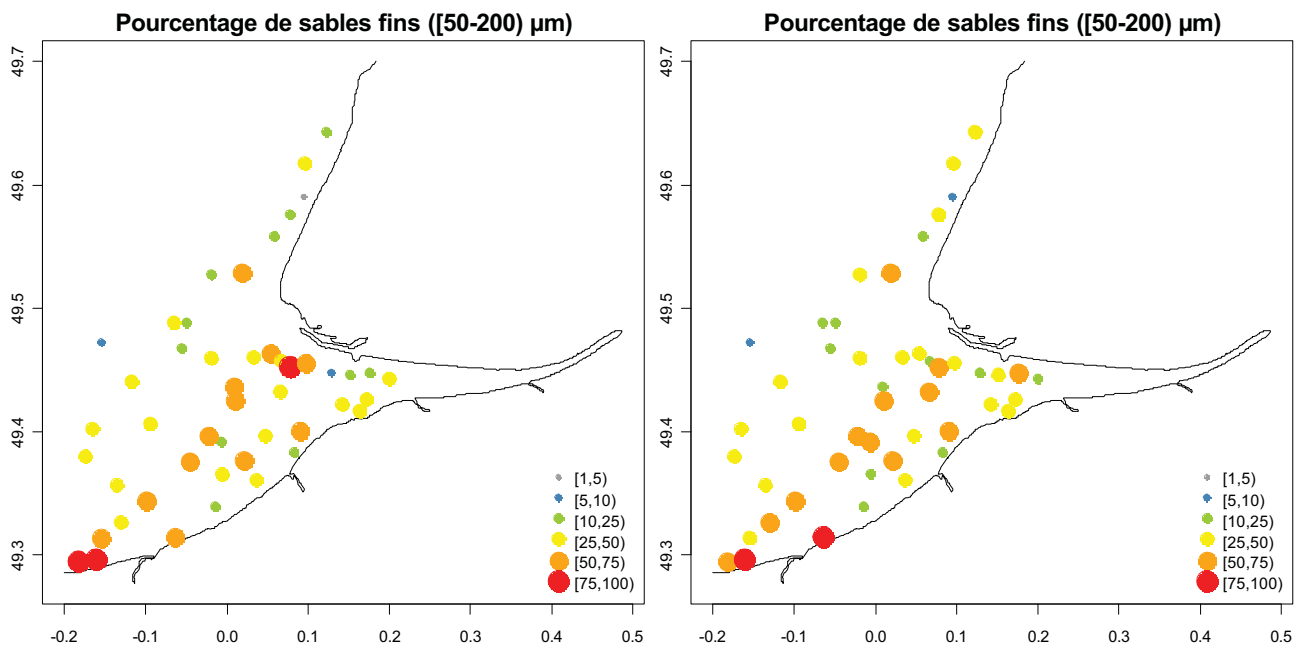


Figure 87 : Distribution spatiale des sables fins ( $[50-200]\mu\text{m}$ ) dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite). Les classes sont exprimées en pourcentage.

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 subtidaux 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.

### ¶ Evolution à long terme : campagnes PECTOW

L'examen des cartes de distribution des teneurs en sables fins de 1988 à 2006 montre une tendance à la diminution au cours du temps. Cependant, si l'on considère chaque année séparément, ces sables sont toujours mieux représentés en baie de Seine Sud-orientale et face à l'embouchure.

#### iv. Distribution des sables moyens

### ¶ Situation actuelle : campagnes COLMATAGE

Les cartes de distribution des sables moyens dans le secteur pour les campagnes 2008 et 2009 ont été réalisées en prenant en considération les particules comprises entre 200 et 500  $\mu\text{m}$  (Figure 88).

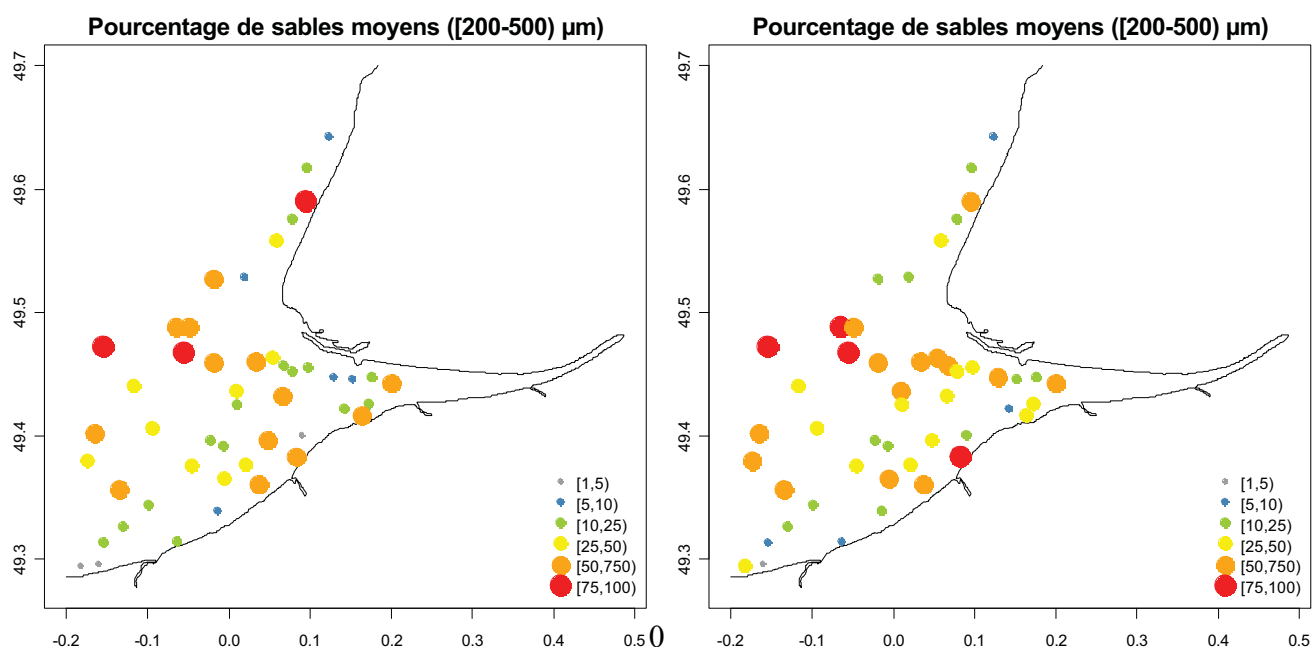


Figure 88 : Distribution spatiale des sables moyens ( $[200-500[\mu\text{m})$ ) dans les fonds subtidiaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite). Les classes sont exprimées en pourcentage.

La répartition des sables moyens semble stable entre les deux années prospectées. Les plus fortes valeurs (entre 51 et 100 %) sont observées chaque année au sein des stations du large proches du Parfond, le long de l'axe prolongeant le chenal de navigation jusqu'aux stations du large proches du banc de Seine et en face de Deauville. A l'embouchure et dans les fonds subtidiaux proches, une plus forte variabilité annuelle est observée.

### ¶ Evolution à long terme : campagnes PECTOW

Nous pouvons remarquer, au travers des cartes de distribution des teneurs en sables moyens obtenues à l'issue du suivi PECTOW, qu'ils sont toujours bien représentés au large au sein des stations proches du banc de Seine. Il est également mis en évidence une expansion de la distribution de cette fraction au cours du temps en des stations en face de l'embouchure. Cette évolution est peut-être à relier à la progradation des bancs de sables observé à l'embouchure (Figure 9). En face de Deauville, les sables moyens sont bien représentés à partir de 1996 et les teneurs sont encore plus élevées en 2001 et en 2006.

### v. Distribution des sables grossiers

### ¶ Situation actuelle : campagnes COLMATAGE

Les cartes de distribution des sables grossiers dans le secteur pour les campagnes 2008 et 2009 ont été réalisées en prenant en considération les particules comprises entre 500 et 2000  $\mu\text{m}$  (Figure 89).

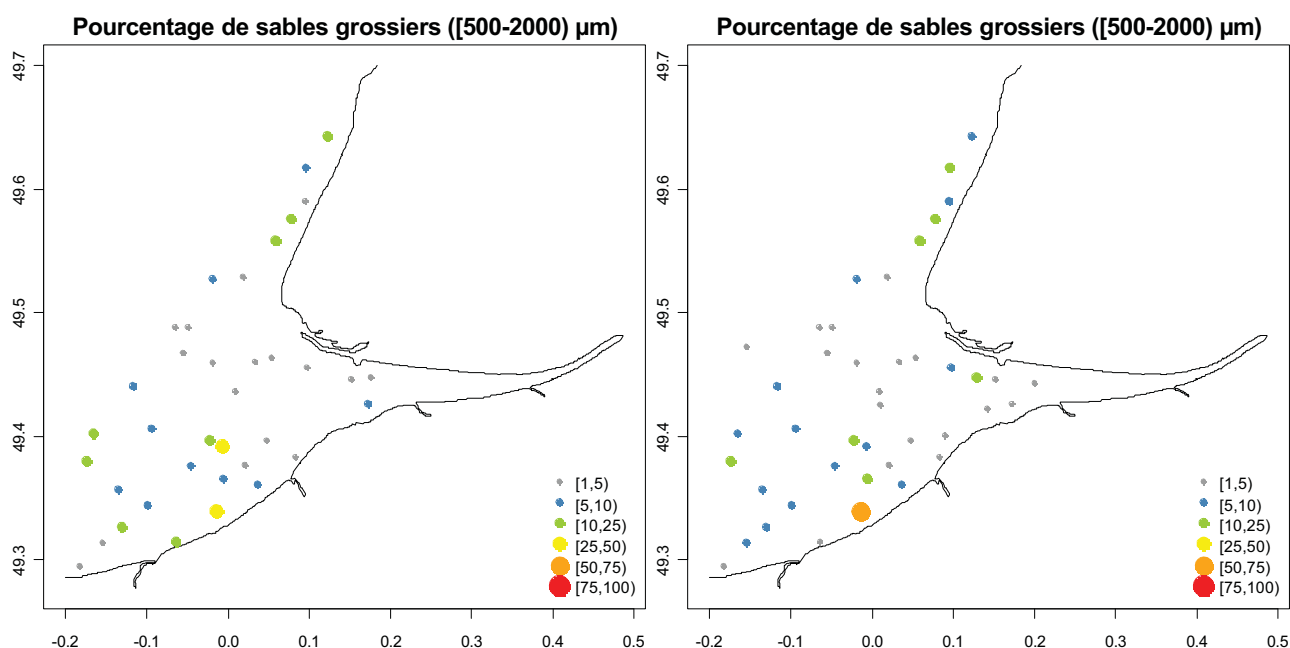


Figure 89 : Distribution spatiale des sables grossiers ( $[500-2000\mu\text{m}]$ ) dans les fonds subtidiaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite). Les classes sont exprimées en pourcentage.

La distribution de cette fraction est également stable entre les deux années étudiées. Elle est bien représentée le long des côtes du Pays de Caux et entre Deauville et Ouistreham jusque dans les fonds plus au large.

#### *∩ Evolution à long terme : campagnes PECTOW*

Cet aspect de la structuration de la fraction de sables grossiers est également apprécié au travers des cartes de leur distribution entre 1988 et 2006. Cependant, une variabilité inter-annuelle est observée, sans qu'une tendance ne soit décelable. Les teneurs en cette fraction sont plus importantes en 1988 et en 1996 que pour les autres années. L'année 1991 était plus caractérisée par une proportion importante de sables fins, l'année 2001 par une proportion plus importante de sables moyens et l'année 2006 par une proportion plus importante de vases.

#### *vi. Distribution spatiale des graviers et coquilles*

Les cartes de distribution des graviers dans le secteur pour les campagnes 2008 et 2009 ont été réalisées en prenant en considération les particules supérieures à 2000 µm (Figure 90).

La distribution de cette fraction est également stable entre les deux années étudiées. Elle est principalement bien représentée le long des côtes du Pays de Caux et entre Deauville et Ouistreham.

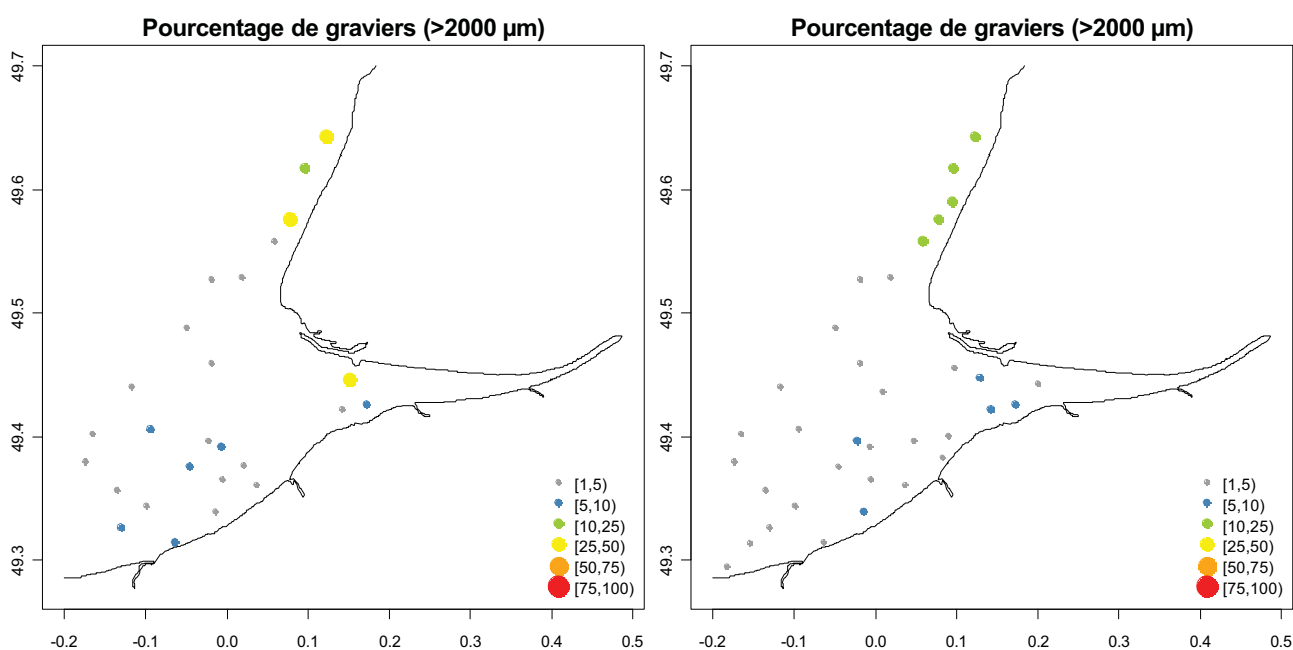


Figure 90 : Distribution spatiale des graviers et coquilles (> 2000 µm) dans les fonds subtidiaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite). Les classes sont exprimées en pourcentage.

Dans la classification granulométrique utilisée, le terme " graviers " est utilisé pour définir les fractions de sédiments dont la taille est supérieure à 2 mm. Ce terme n'est cependant pas très bien adapté au secteur étudié puisque cette fraction représente en réalité soit des coquilles ou débris coquilliers, soit de véritables graviers, soit un mélange des deux. Les véritables graviers sont rencontrés essentiellement entre Le Havre et Antifer ainsi qu'à l'embouchure dans les Fosses Nord et Sud. Cependant, notamment en baie de Seine Sud-orientale et dans la zone du large proche du Parfond, ce sont des débris coquilliers de taille supérieure à 2 mm qui représentent le mieux cette classe.

## **2. Texture sédimentaire : état actuel (COLMATAGE 2008-2009)**

### ***a. Analyse complémentaire des granulométries des prélèvements réalisés à la benne Van Veen et à la benne Shipeck, confrontation avec les photographies des prélèvements***

Pour des soucis de clarté, les histogrammes et les courbes cumulées des pourcentages pondéraux des différentes fractions granulométriques des stations visitées en 2008 sont regroupées en Annexe 4, avec les photographies des sédiments correspondantes. L'intégralité des stations échantillonnées n'y figure pas, mais des exemples caractéristiques donnent un bon aperçu des différentes distributions que l'on peut rencontrer dans le secteur. Les histogrammes et courbes cumulées des différentes fractions, correspondant aux résultats des analyses granulométriques par tamisage, sont présentés sur un même graphique pour chaque station. Les courbes des pourcentages cumulés issues des résultats de l'analyse Laser sont également superposées à ces graphes. Il est vrai que si la superposition des courbes n'est pas strictement comparable et qu'elle peut être discutable, ce choix de représentation permet néanmoins de comparer plus facilement les résultats issus des deux méthodologies tout en conservant l'intégralité des données disponibles pour chacune. Cette démarche de comparaison s'est accompagnée d'une visualisation des photographies des sédiments pour tenter d'expliquer les différences parfois observées.

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

Nous avons pu constater que la moitié des stations étudiées présentent des résultats très similaires entre les deux méthodologies. Elles concernent en majorité des sédiments essentiellement composés de sables moyens à fins. Un exemple est donné avec la station 13 qui peut être caractérisée par des sables moyens à fins propres (entendre ici par "propre", que l'eau surnageant les sédiments est claire, témoignant d'une absence de vase). Lorsqu'une fraction plus grossière est présente dans les sédiments, il peut arriver que les courbes soient également superposables. C'est le cas de la station 22 qui est caractérisée par des sables moyens à fins



légèrement grossiers. Les courbes issues des deux méthodologies peuvent également être similaires dans les cas où les sédiments présentent une texture hétérogène, mais ce cas est plus rare. C'est le cas de la station 5 qui est caractérisée par des sables et des vases en mélange.

### *ii. 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.

C'est notamment le cas de la station 17 pour laquelle l'analyse Laser réalisée sur les sédiments de la benne Shipeck révèle une fraction de sables grossiers plus importante. Cependant, les photographies des sédiments prélevés avec l'une ou l'autre des bennes ne permettent pas d'expliquer cette différence. Cela témoigne de la sensibilité des résultats d'une analyse Laser sur des sédiments présentant une fraction grossière. Cette sensibilité est à relier au très faible volume de sédiments sous-échantillonné pour ce type d'analyse.

Un cas similaire concerne la station 6 où l'analyse sur les sédiments prélevés à la benne Shipeck enregistre une fraction grossière plus importante. En se rapportant aux photographies, l'explication semble être à rechercher dans la texture de ces sédiments. Nous sommes en présence d'une couverture de sables grossiers en surface d'un mélange sablo-vaseux. L'analyse réalisée sur les sédiments de la benne Van Veen, ne privilégiant pas cette fine couche de surface, a mis en évidence une proportion plus importante de sables moyens à fins.

L'inverse est rencontré à la station 32, la granulométrie réalisée sur les sédiments prélevés à la benne Van Veen se révèle plus grossière. L'explication est perçue au travers des photographies où on aperçoit une couche de sédiments superficiels sableux probablement en transit sur des sédiments plus grossiers.

### *iii. 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. C'est le cas de la station 18 caractérisée essentiellement par des sables moyens à fins. Alors que nous pouvons y remarquer la présence de galets mous superficiels, il est possible que leur abrasion par le sable augmente localement la teneur en fine en surface. Dans ce cas, l'analyse granulométrique effectuée par tamisage sur un plus grand volume de sédiments ne privilégie plus cette proportion de vase et semble mieux définir l'ensemble sédimentaire à dominante sableuse. La station 38 permet de rendre compte de cette différence, mais cette fois, elle est liée à la présence de vase fluide probablement en transit en surface de sédiments fins sableux.

D'autres configurations sédimentaires peuvent aboutir à un résultat similaire, c'est notamment le cas de stations caractérisées par un mélange sablo-vaseux comme à la station 28. Ce mélange sablo-vaseux n'est pas 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. C'est par exemple le cas de la station 3, prélevée à la benne Shipeck, qui est caractérisée par un mélange de vases et de sables, alors que la benne Van Veen a prélevé essentiellement du sable propre. L'inverse est rencontré à la station 29.

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.

#### ***b. 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 répliquat) 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 semblait pertinent de prendre en compte : i) la présence de

vase fluide en surface ; ii) la présence de galets mous en surface ; iii) la présence d'une stratification ; iv) l'hétérogénéité entre les réplicats ; v) la notion de cohésion sédimentaire et la notion de remaniement sédimentaire.

Ces variables comportent chacune plusieurs modalités qui sont présentées par la suite. 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 répliat a parfois suffi à attribuer à la station la modalité correspondante. Les exemples photographiques des stations citées, accompagnés des différentes modalités choisies pour caractériser les sédiments, sont regroupés en Annexe 5. Les différents exemples présentés résument bien les différentes textures sédimentaires rencontrées dans le secteur.

#### *i. 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" comme dans le cas des prélèvements 19 VV4 et 39 VV2 prélevés en 2009, "VF2" pour "quantité moyenne" comme dans le cas des prélèvements 25 SCH et 36 SCH prélevés (respectivement) en 2008 et en 2009, et "VF3" pour "grande quantité" comme dans le cas des prélèvements 38 VV5 et 36 VVG prélevés (respectivement) en 2009 et en 2008.

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, nous pouvons souvent apprécier sa présence dans l'échantillon. 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. Nous les retrouvons le long des côtes du Pays d'Auge qu'en 2008.

La Figure 91 représente la distribution spatiale de ces différentes modalités pour les années 2008 et 2009. La présence de ce type de vase en baie de Seine Nord et Sud-orientale représente un envasement différé, à relier aux crues estuariennes (Lesourd, 2000 ; Garnaud, 2003).

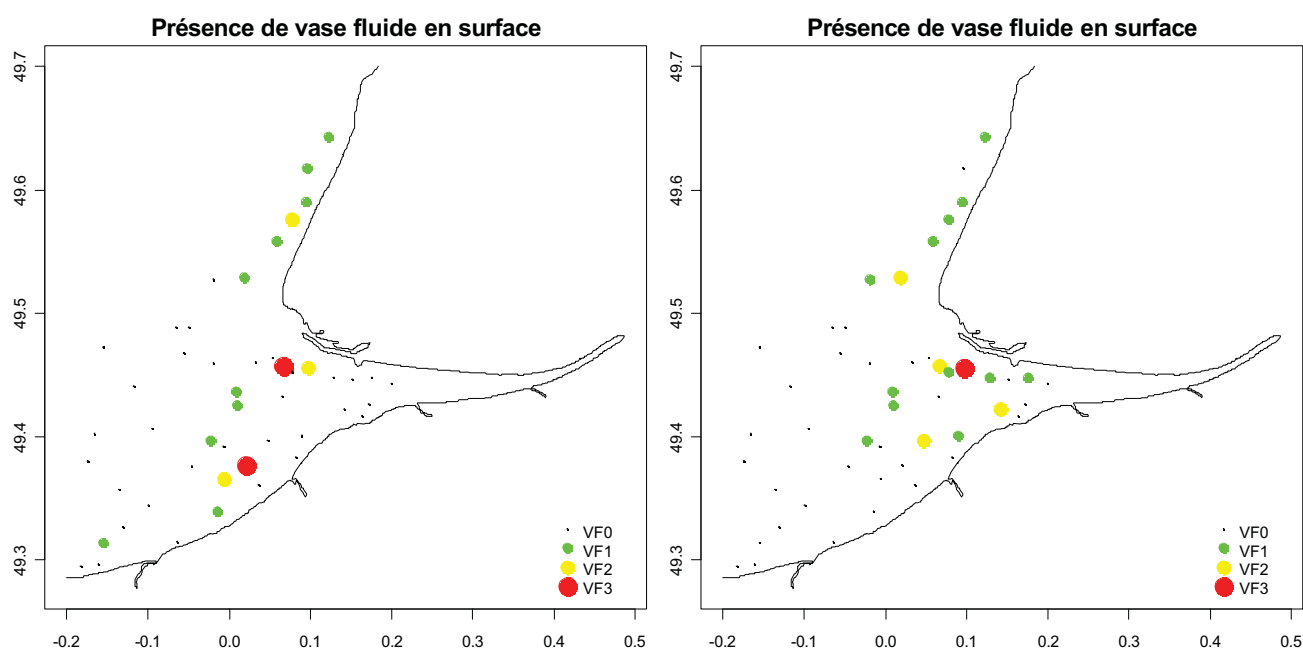


Figure 91 : Distribution spatiale de la présence de vase fluide en surface des sédiments dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite).

## ii. 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" comme pour les prélèvements 14 VVG et 17 SCH échantillonnés en 2008, "G2" pour "quantité moyenne" comme pour les prélèvements 48 VV1 et 39 SCH échantillonnés en 2009, et "G3" pour "grande quantité" comme pour les stations 46 VVG et 46 SCH prélevées (respectivement) en 2008 et en 2009.

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.

La Figure 92 représente la distribution spatiale de ces différentes modalités pour les années 2008 et 2009.

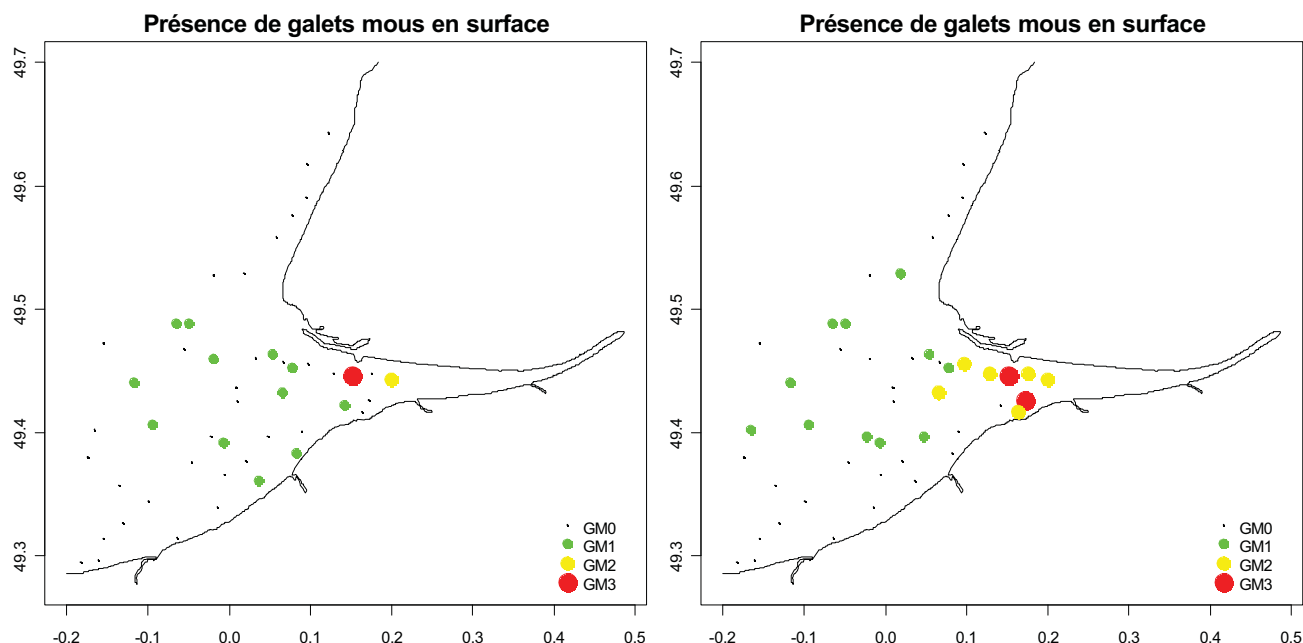


Figure 92 : Distribution spatiale de la présence de galets mous en surface des sédiments dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite).

### iii. 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 :

(i) "REmelSV" pour "mélange sablo-vaseux". Cette modalité a été attribuée à des stations pour lesquelles on distingue aisément une structure sablo-vaseuse relativement compacte. Cette texture sédimentaire, liée à une teneur en vase suffisante pour permettre une cohésion sédimentaire, est visible aux stations 6 et 2 échantillonnées en 2008. 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.

(ii) "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. Deux exemples typiques sont les stations 54 et 39 échantillonnées (respectivement) en 2009 et en 2008.

(iii) "REscq" pour "sables coquilliers" comme pour les stations 20 et 29 échantillonnées (respectivement) en 2008 et en 2009. Ces dépôts comportent une grande proportion de débris coquilliers (coquilles entières et brisées), jusqu'à 90 % de la masse de l'échantillon.

(iv) "Renon" pour "non remanié" dont les exemples sont donnés pour les stations 10 et 25 échantillonnées (respectivement) en 2008 et en 2009. Ces échantillons sont ceux qui ne sont pas classés dans les types précédents, ils ne comportaient pas de texture particulière.

#### *iv. 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 :

(i) "COHoui" pour "cohésif" quand une compaction globale des sédiments est observée. Nous pouvons identifier cette notion de cohésion au sein des sédiments remaniés de type "mélange sablo-vaseux" comme vu à la station 2 échantillonnée en 2008. Nous pouvons l'identifier également dans le cas de sédiments de type vase noire compacte comme aux stations 39 et 54 échantillonnées (respectivement) en 2008 et en 2009.

(ii) "COHnon" pour "non cohésif" quand les sédiments ne sont pas compactés. Il est à noter que si à la station 6, échantillonnée en 2008, il a été attribué la modalité "mélange sablo-vaseux", ce mélange relativement cohésif n'est pas dominant et est associé à des sédiments à dominante sableuse. Il est alors fort probable que pour cette station, une couverture sableuse plus épaisse et mobile en surface puisse jouer un rôle abrasif sur ce mélange sablo-vaseux et ainsi favoriser sa déstructuration. Dans ce cas, la modalité "non cohésif" a été attribuée.

#### *v. 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 réplicats 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. Des exemples de stratification identifiée concernent les stations 2 et 20 échantillonnées en 2008 et la station 54 échantillonnée en 2009.

#### **vi. Hétérogénéité entre réplicats**

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

(i) "HE0" pour "hétérogénéité nulle". Elle a été définie principalement pour des stations essentiellement sableuses comme la station 10 prélevée en 2008 et/ou caractérisant des fonds très homogènes à l'échelle de la station comme la station 25 échantillonnée en 2009.

(ii) "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 répliat. C'est le cas de stations 6, 8 et 39 échantillonnées en 2008.

(iii) "HE2" pour "hétérogénéité moyenne" concerne des stations comprenant un répliat ou deux différents des autres, ou encore dans des cas où la benne Van Veen avait mal fonctionné sur un ou deux réplicats. 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 comme visible à la station 20 échantillonnée en 2008. 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.

(iv) "HE3" pour "hétérogénéité forte" a été attribuée à quelques stations montrant des réplicats dont les sédiments pouvaient être complètement différents. C'est le cas des stations 54 et 29 échantillonnées en 2009. Ces stations sont caractérisées par une structure exceptionnelle : alors que l'hétérogénéité observée à la station 54 est due à la déstructuration des fonds de vases noires compactes rencontrés à l'embouchure, le caractère fortement hétérogène de la station 29 pourrait être attribué à des fonds formés par des mégarides, au sein desquelles sont accumulés des débris coquilliers sur socle de vase holocène, et sur lesquelles peuvent transiter des matériaux plus fins. Outre ces cas particuliers, une hétérogénéité entre répliat, en baie de Seine Sud-orientale, est attribuée le plus souvent à des stations caractérisées par des mélanges sablo-vaseux et est souvent associée à la répartition en patchs de l'annélide tubicole *Owenia fusiformis*.

La Figure 93 représente la distribution spatiale de ces différentes modalités pour les années 2008 et 2009.

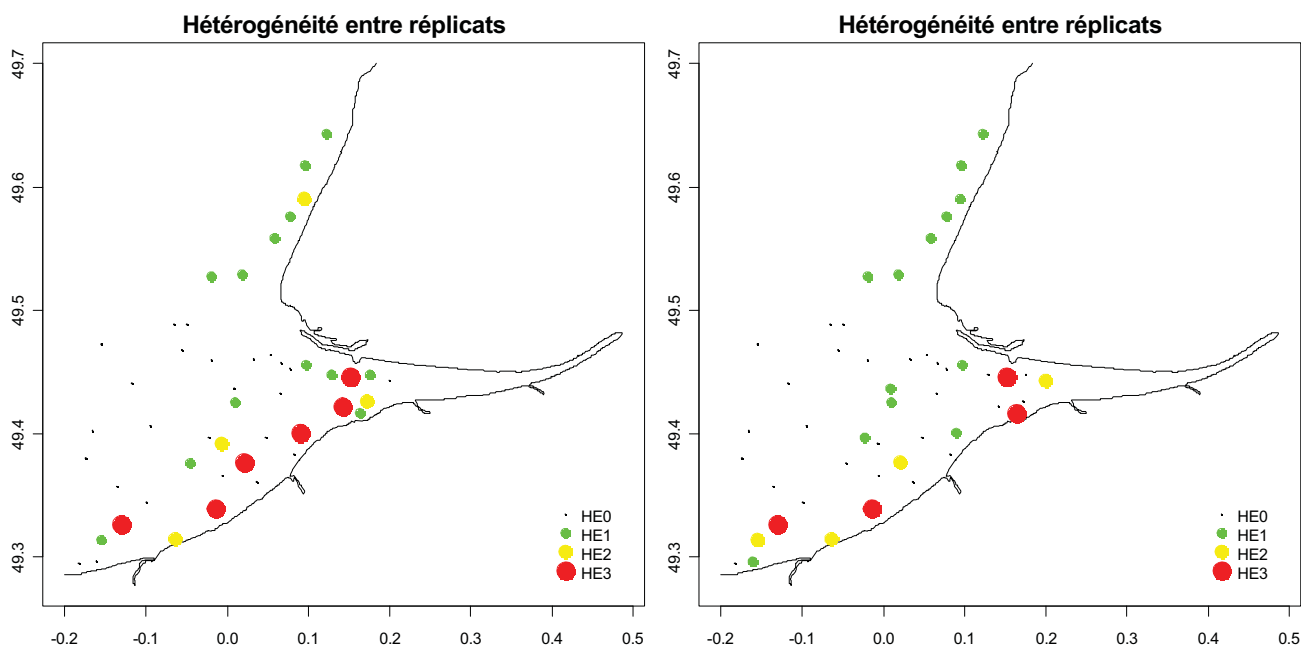


Figure 93 : Distribution spatiale de la notion d'hétérogénéité entre répliquats dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite).

### 3. 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. Toutes les caractéristiques sédimentaires présentées, qu'elles soient axées sur la granulométrie du sédiment ou sa texture, représentent une masse d'informations qu'il est souhaitable de synthétiser.

#### a. 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.

##### i. 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 94 illustre les modifications apportées par regroupement de classes et la dénomination choisie pour définir ces nouveaux groupements.

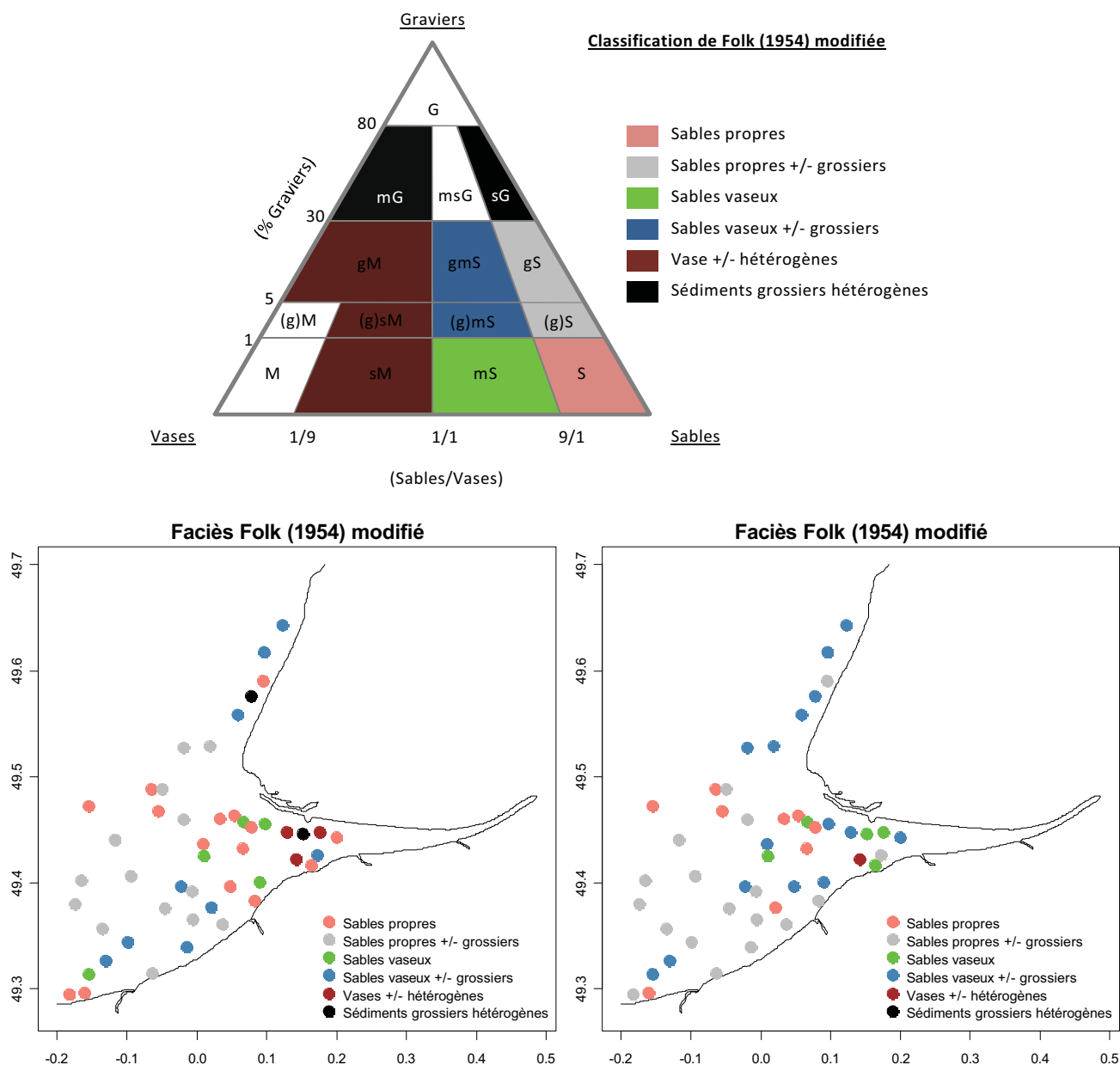


Figure 94: Diagramme de Folk (1954) modifié (haut), les cases non colorées de ce diagramme correspondent aux géo-faciès non rencontrés en 2008-2009. Distribution spatiale des six géo-faciès sédimentaires identifiés selon cette classification dans les fonds subtidiaux de la baie de Seine Orientale en 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. 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 on pressent en 2009 une baie de Seine Sud-orientale moins envasée et une embouchure où les sables vaseux semblent dominants sur les vases.

## ***ii. 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 95 illustre cette classification ainsi que les cartes de distribution spatiale de ces types sédimentaires.

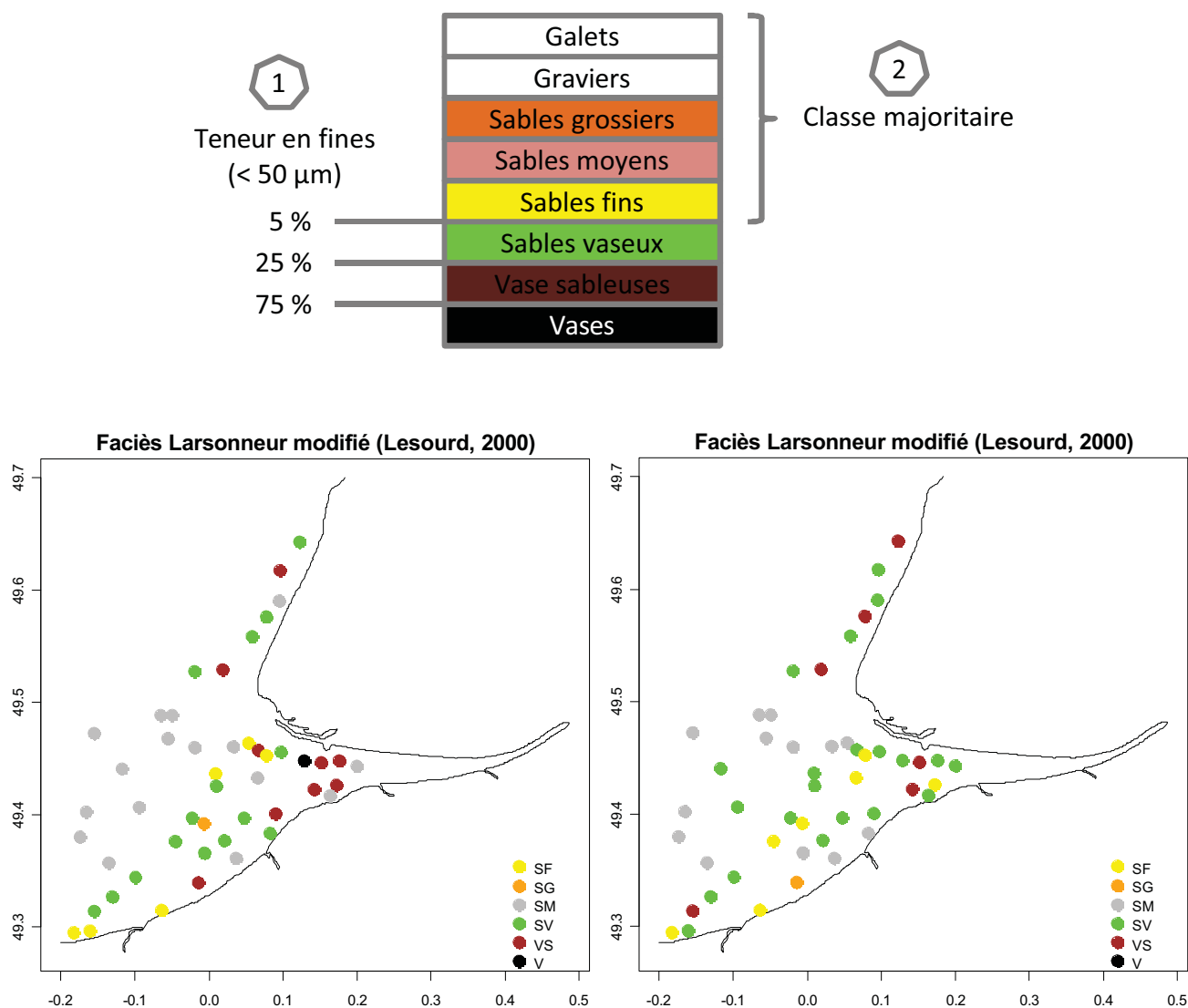


Figure 95 : Classification de Larsonneur modifiée (Lesourd, 2000) (haut), les cases non colorées de ce diagramme correspondent aux géo-faciès non rencontrés en 2008-2009. Distribution spatiale des faciès sédimentaires selon cette classification dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en 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.

## **b. Méthodes d'ordination**

### *∇ Méthodes et stratégie d'analyse*

Les méthodes d'analyses multivariées ont également le rôle de synthétiser les informations recueillies. Ces analyses ont été mises en œuvre à l'aide du logiciel R, système d'analyses statistiques et graphiques créé par Ihaka et Gentleman (1996). Dans ce logiciel les analyses sont réalisées *via* un langage de programmation en pleine expansion et de plus en plus utilisé par le monde de l'entreprise, de l'enseignement et de la recherche. Il est flexible, très complet et presque toutes les méthodes d'analyses statistiques peuvent être réalisées à l'aide de bibliothèques de programmes gratuits (paquets ou packages). Dans ces paquets, on dispose de fonctions permettant de mettre en œuvre tous types d'analyses. Son développement et sa distribution sont assurés par des statisticiens rassemblés dans le *R Development Core Team* (R Development Core Team, 2005). La mise en œuvre des analyses présentées ici a nécessité le téléchargement du paquet *{FactoMineR}* et *{ade4}*.

Une technique d'ACP (Analyse en Composantes Principales) a été réalisée pour effectuer l'ordination des stations en fonction des données granulométriques quantitatives, et une technique d'AFM (Analyse Factorielle Multiple) a été réalisée pour effectuer l'ordination des stations depuis les données qualitatives issues de l'analyse texturale des sédiments.

Ces deux types d'analyses sont mises en œuvre par la fonction *dudi.hillsmith()*, qui permet de réaliser l'analyse de Hill et Smith. Cette analyse permet de traiter à la fois des données quantitatives et des données qualitatives. Elle se comporte comme une ACP normée lorsque les variables sont uniquement quantitatives, et comme une AFM lorsque les variables sont uniquement qualitatives. Pour la représentation cartographique de l'organisation sédimentaire sur le territoire de la baie de Seine et son embouchure, la technique de classification hiérarchique a été effectuée sur les résultats des analyses multivariées par les fonctions *dist.dudi()* et *hclust()*, selon la distance euclidienne et la méthode d'agrégation de Ward. Les groupes ainsi définis ont ensuite été cartographiés pour en apprécier leur distribution spatiale.

Les difficultés propres à l'utilisation de ces analyses touchent entre autre à leur sensibilité par rapport au nombre de facteurs pris en compte, à la répartition des valeurs au sein de ces variables et à la présence d'"outliers" (points extrêmes). Elles sont souvent utilisées comme moyen d'exploration de données écologiques, mais une certaine subjectivité leur est fatalement attribuée si l'on veut leur conférer le rôle d'outil d'interprétation et de compréhension de la structure et de l'organisation d'un écosystème donné. Cette subjectivité peut être liée au besoin de répondre à une problématique ou une question précise préalablement formulée. Chaque analyse est donc guidée par le point de vue de l'"observateur", à la fois en amont dans le choix des facteurs pris en



compte ou des transformations réalisées sur les données, et en aval lorsque l'on doit déterminer le niveau de coupure d'une classification hiérarchique.

En réalisant deux ACP normées séparées sur les matrices correspondant aux années 2008 et 2009, les regroupements de stations étaient difficilement comparables d'une année sur l'autre. L'ACP normée et l'ACM ont donc été réalisées sur des matrices de données regroupant les deux années échantillonnées (2008 et 2009). Les résultats obtenus étaient les plus pertinents et les plus cohérents avec ce que nous savions de l'organisation du système au regard des connaissances déjà acquises et à partir du travail réalisé sur l'analyse des photographies de sédiments. D'autre part, regrouper les deux années dans la même matrice permet de faciliter les comparaisons entre elles.


### *∇ Ordination spatiale des stations et typologie sur la base de la texture sédimentaire*


L'ordination des stations à partir de l'ACM sur les données de texture sédimentaire ne prend en compte que les variables "cohésion sédimentaire", "stratification" et "remaniement sédimentaire".


Les variables "vases fluides en surface" et "galets mous" ne montraient pas d'intérêt à être incluses dans l'analyse, au sens où elles ne sont pas considérées comme caractérisant le mieux l'habitat sédimentaire dans lequel peut vivre la macrofaune benthique. Ces vases ne sont qu'en transit en surface, et d'après les travaux de Janson (2007), il est fort probable que la faune n'y soit pas sensible.

Il n'a pas été jugé bon d'inclure non plus la variable "hétérogénéité entre réplicats" puisque cette caractéristique se superpose à des faciès sédimentaires variés, et empêcherait alors l'analyse de mettre en avant ce que nous cherchions à définir, c'est-à-dire une typologie de faciès dans le sens de l'habitat sédimentaire pour les différentes espèces de la macrofaune benthique.


La Figure 96 représente les principaux résultats de l'ACM et les six groupes de stations définis, ainsi que leur distribution spatiale.

 Le premier groupe défini composé de 23 stations en 2008 ainsi qu'en 2009, ne présentait pas de caractéristiques particulières et est dans l'ensemble représenté par des sédiments majoritairement sableux et non remaniés.

 Le groupe 2, très isolé et composé de 2 stations en 2008 et d'une station en 2009, est caractérisé par des sables coquillers.

 Les groupes 3 (composé de 5 stations en 2008 et de 6 stations en 2009), 4 (composé de une station en 2008 ainsi qu'en 2009) et 5 (composé de 10 stations en 2008 ainsi qu'en 2009), sont caractérisés par un mélange sablo-vaseux de cohésion et de stratification variables. Une précision peut être apportée concernant les différences entre ces trois groupes : i) Le caractère

cohésif du mélange sablo-vaseux des stations du groupe 5 suppose une forte teneur en vase au sein de sédiments sableux permettant leur compaction. Il en résulte un mélange cohésif relativement homogène à l'échelle même d'un échantillon (réplicat) ; ii) Si la présence d'un mélange sablo-vaseux cohésif est présent aux stations du groupe 4, il n'est pas homogène à l'échelle du répliat. Il est accompagné de sédiments sableux mobiles en surface et pouvant avoir le rôle de déstructurer le mélange sablo-vaseux cohésif sur lequel ils transitent. Il en résulte une cohésion sédimentaire qui n'est plus aussi homogène à l'échelle du répliat (comme le cas des stations du groupe 5). Les stations de ce groupe sont caractérisées par un mélange sablo-vaseux stratifié mais dont la cohésion n'est pas marquée. Ce groupe peut être vu comme un intermédiaire entre le groupe 5 et le groupe 3 ; iii) Les stations du groupe 3 sont caractérisées par la non cohésion des sédiments et l'absence de stratification. Cette structuration est associée à des sables et des vases sableuses en mélange hétérogène, la structure en mosaïque à l'échelle du répliat étant perceptible.

 Les groupes 6 (composé de 6 stations en 2008 et de 3 stations en 2009) et 7 (composé d'une station en 2008 et de deux stations en 2009) sont cantonnés dans l'embouchure. Ces stations sont caractérisées par des vases noires compactes en cours de démantèlement, en surface desquelles peuvent transiter des sédiments en épaisseur variable.

Dans l'ensemble, nous avons un gradient entre les stations les plus au large (proches du banc de Seine et du Parfond) dont les sédiments essentiellement sableux semblent relativement bien classés, et les autres stations plus côtières présentant des structures plus complexes. La comparaison de la situation entre les deux années ne montre pas de franche évolution, les structures définies présentent une forte stabilité inter-annuelle. Il peut être précisé qu'au sein des stations côtières présentant une structure complexe, une couverture sédimentaire sableuse plus épaisse en 2009 qu'en 2008 est observée. Son épaisseur n'a cependant pas été codée car difficilement quantifiable à partir de l'analyse photographique. Au sein d'une même année, cette portion sableuse est plus épaisse en baie de Seine Sud-orientale qu'en baie de Seine Nord-orientale.

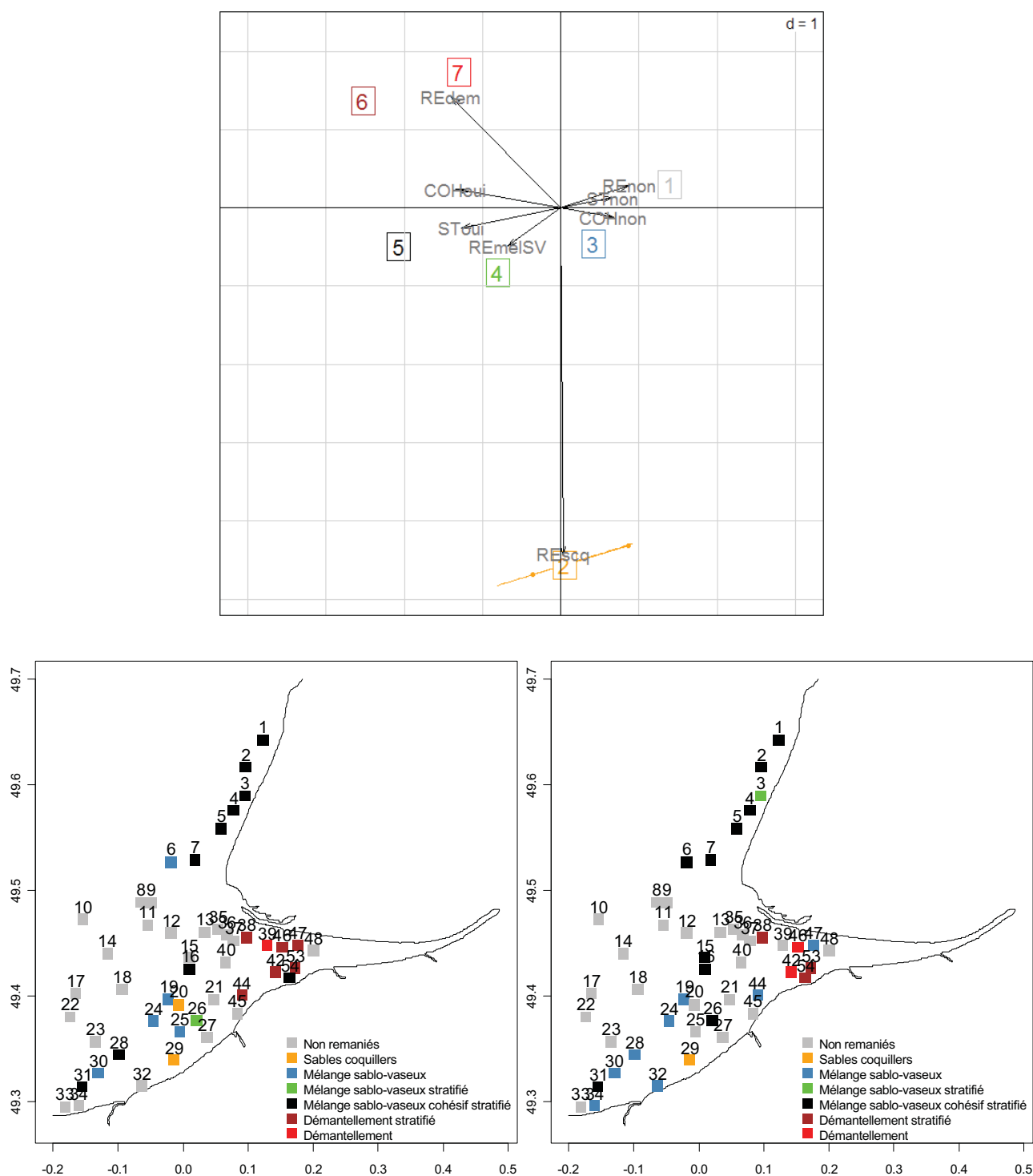


Figure 96: Ordination spatiale des groupes de stations et des différentes modalités issues de l'analyse texturale des sédiments sur le plan factoriel définis par les deux premiers axes de l'ACM pour les deux années 2008 et 2009 confondues (haut). Cartographie spatiale des types sédimentaires identifiés correspondant au découpage de l'arbre hiérarchique en neuf groupes pour l'année 2008 (bas et gauche) et 2009 (haut et droite).

### *¶ Ordination des stations par ACP sur les données granulométriques*

Dans un premier temps, une analyse ACP sur les données granulométriques a été réalisée, intégrant les cinq classes granulométriques, ainsi que la teneur en Matière Organique dans les sédiments. Elle a montré une forte corrélation entre les teneurs en fines et en Matière Organique. Cette dernière a donc été considérée comme une information redondante et les résultats présentés ici n'en tiennent pas compte.

La classification hiérarchique obtenue sur la base du triplet statistique de l'ACP des données granulométriques, intégrant les cinq classes, définit trois groupes majoritaires qui sont eux-mêmes scindés en trois sous-groupes chacun. Elle est représentée sur la Figure 97 et s'associe à une aide à l'interprétation : les variables significativement corrélées au découpage réalisé. Sur cette Figure est également représentée la distribution spatiale de ces groupes et sous-groupes, correspondants aux deux niveaux de coupure du dendrogramme pour les deux années échantillonnées. Les sorties graphiques, concernant l'ordination spatiale des stations dans le plan factoriel défini par les trois premiers axes de l'analyse, sont représentées sur la Figure 98 pour chaque année échantillonnée. Les 9 sous-groupes de stations y sont projetés sous forme d'ellipses pour aider à identifier plus finement l'organisation sédimentaire du système. Elles s'accompagnent de l'ordination des cinq variables granulométriques prises en compte dans l'analyse.

S'il est souvent rappelé le manque d'objectivité associé au choix du niveau de coupure d'un dendrogramme, il semble que cela doit être discuté en fonction des données étudiées, des questions posées et de l'échelle d'observation. Un premier choix s'est porté sur un niveau de coupure élevé autorisant une vision à l'échelle globale de la baie de Seine Orientale et son embouchure, et un découpage plus fin permettant de déceler les nuances au sein des groupes majoritaires prédéfinis. Le secteur étudié est caractérisé, comme nous l'avons vu par des faciès sédimentaires variés. Dans le but d'étudier finement les relations faune – sédiments dans un secteur aussi diversifié que la baie de Seine Orientale et son embouchure, il semble en effet intéressant de préciser les trois groupes majoritaires rencontrés afin d'en apprécier l'hétérogénéité. Le second niveau de coupure de ce dendrogramme a donc été réalisé en tenant compte le mieux possible des plus grands sauts rencontrés au plus bas de l'arbre et de la connaissance du terrain. La projection des neuf sous-groupes sur le plan factoriel défini par les deux premiers axes de l'ACP a comme objectif d'aider à caractériser les types sédimentaires.

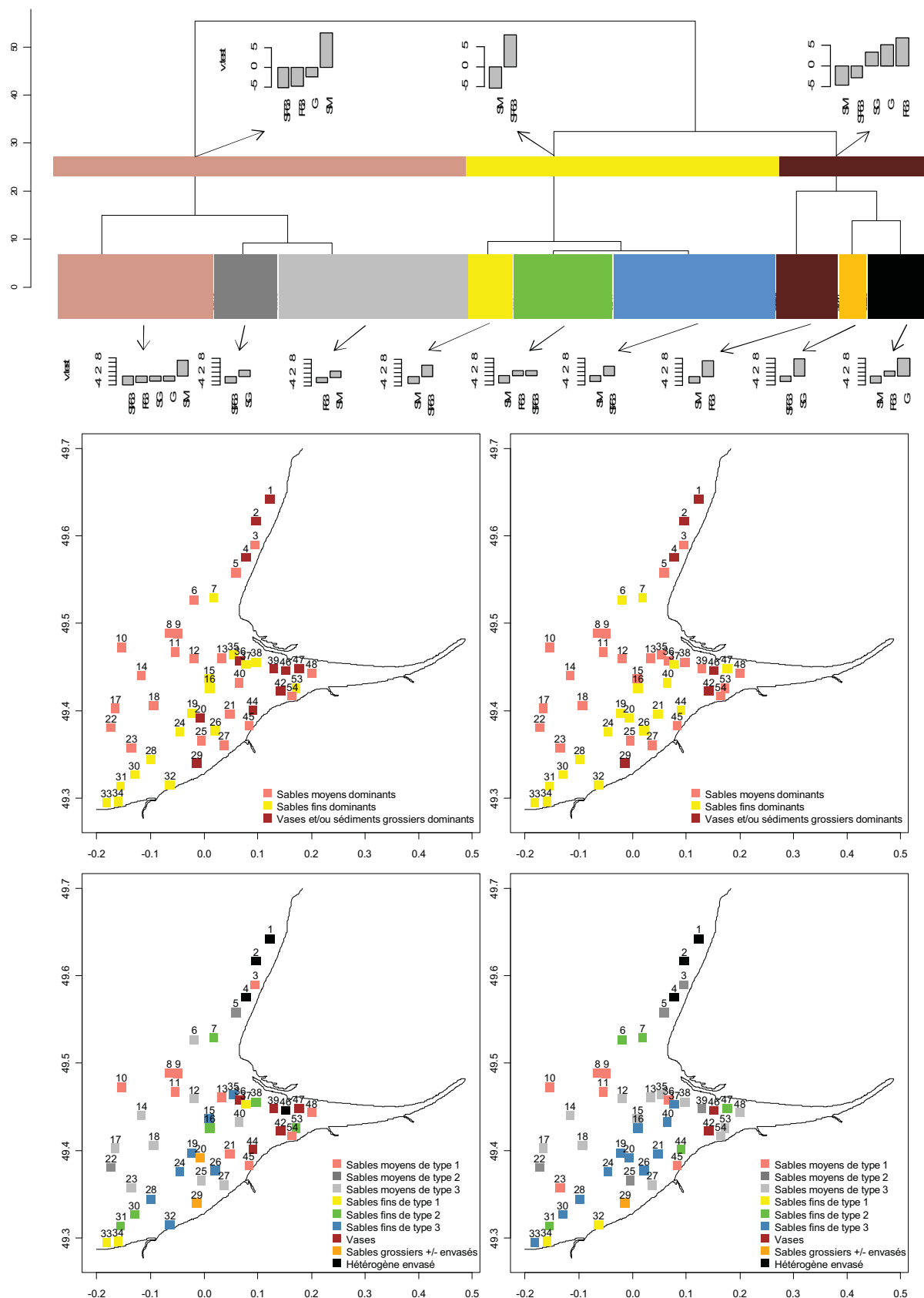


Figure 97 : Classification hiérarchique obtenue sur la base du triplet statistique de l'ACP normée des données granulométriques intégrant les cinq classes (F63 : vases < 63  $\mu\text{m}$ , SF63 : sables fins (entre 50 et 200  $\mu\text{m}$ ), SM : sables moyens (entre 200 et 500  $\mu\text{m}$ ), SG : sables grossiers (entre 500 et 2000  $\mu\text{m}$ ), G : graviers (> 2000  $\mu\text{m}$ )) (haut). Cartographie spatiale des géo-faciès correspondant au découpage de l'arbre hiérarchique en trois groupes pour l'année 2008 (haut et gauche) et 2009 (haut et droite), au découpage en neuf sous-groupes pour l'année 2008 (bas et gauche) et 2009 (bas et droite).

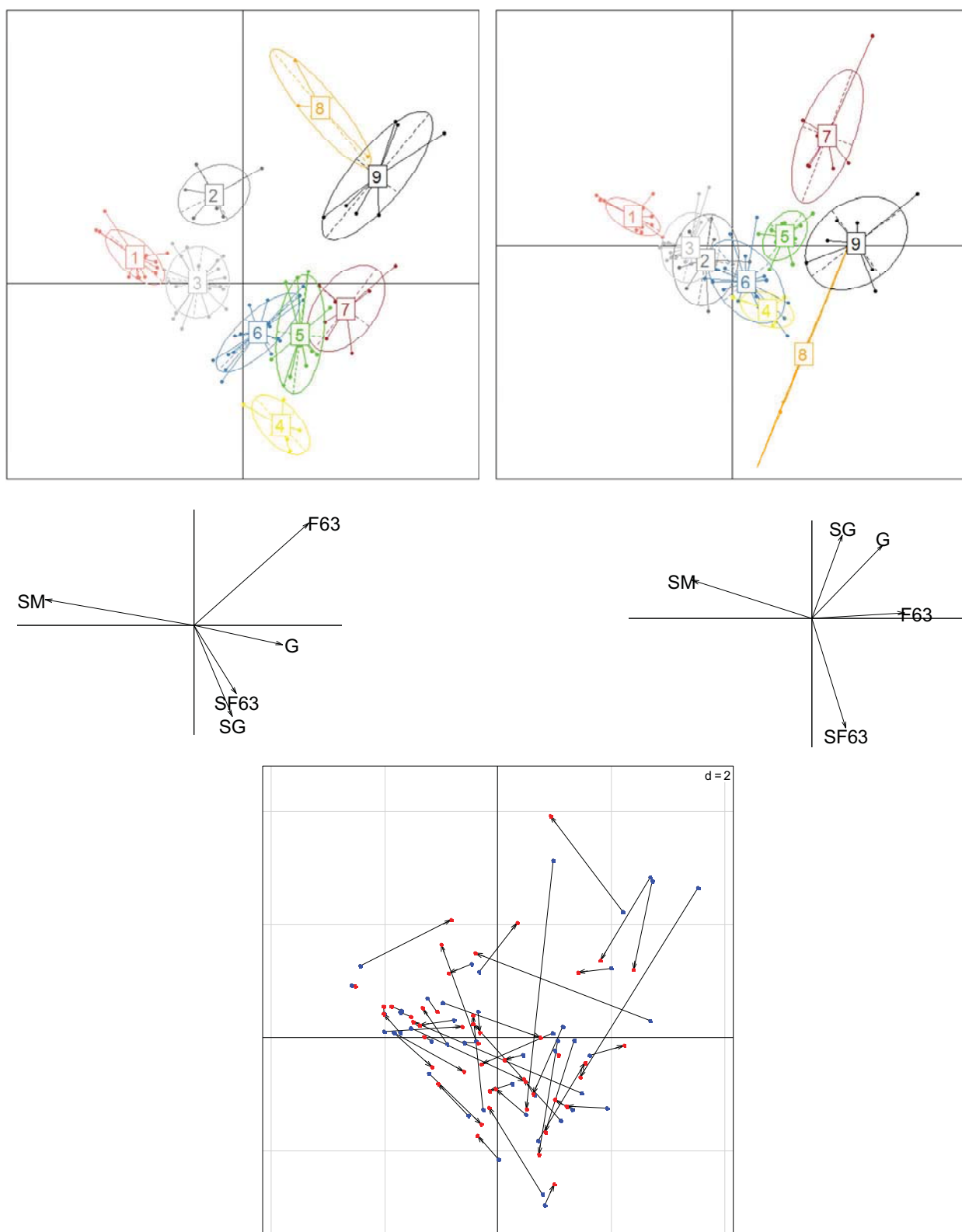



Figure 98: Ordination spatiale des stations sur le plan factoriel défini par les trois premiers axes de l'ACP normée sur les cinq classes granulométriques (F63 : vases < 63  $\mu\text{m}$ , SF63 : sables fins, SM : sables moyens, SG : sables grossiers, G : graviers). Axes 1 et 2 et projection des variables pour les années 2008 et 2009 (haut et gauche), Axes 1 et 3 et projection des variables pour les années 2008 et 2009 (haut et droite). Les 9 sous-groupes de stations formés par classification hiérarchique sur le triplet statistique de l'ACP y sont représentés par des ellipses. Trajectoire des stations dans le plan factoriel entre l'année 2008 (points bleus) et 2009 (points rouges) (bas et droite).





Dans un premier temps, la vision d'ensemble (découpage du dendrogramme en trois groupes majoritaires) permet de distinguer un groupe de stations dominé par les sables moyens (21 stations en 2008 et 22 stations en 2009), un groupe de stations dominé par les sables fins (16 stations en 2008 et 18 stations en 2009) et un groupe de stations dominé par les vases et/ou les sédiments les plus grossiers de type sables grossiers et graviers (11 stations en 2008 et 6 stations en 2009). La cartographie de la distribution spatiale de ces trois groupes majoritaires permet d'apprécier un gradient spatialement identifiable des sables moyens au large (zones proches du banc de Seine et du Parfond) vers les vases dans les zones plus côtières (entre le Havre et Antifer puis à l'embouchure) en passant par les sables fins dominants en position intermédiaire (baie de Seine Sud-orientale et dans une moindre mesure à l'embouchure). Ce résultat est cohérent avec le constat général d'un affinement sédimentaire en relation avec une diminution de l'intensité des courants de marée du large vers les milieux côtiers moins profonds, observé lors d'études antérieures présentées au Chapitre 1. Cependant, ce gradient n'est pas si franc et des exceptions peuvent être rencontrées. Si les sables moyens sont les mieux représentés au sein des stations les plus au large (à proximité du banc de Seine et du Parfond), ils peuvent également être caractéristiques de certaines stations plus côtières comme en face de Deauville, sur la zone du dépôt de dragage du Kannick et à l'embouchure, mais avec une variabilité spatiale et inter-annuelle plus prononcée. Alors que les sables fins dominent les stations situées le long d'un axe entre le Havre et Ouistreham, une variabilité spatiale inter-annuelle est également observée, notamment en quelques stations en face de Deauville et sur la zone de dépôt de dragage du Kannick. Aussi, les stations à dominance vaseuse sont principalement présentes à la côte entre le Havre et Antifer, en baie de Seine Sud-orientale et à l'embouchure, mais une forte variabilité spatiale et inter-annuelle y est observée. Enfin, les sables grossiers et les graviers (ou coquilles) s'incorporent au sein de ces ensembles sédimentaires.

Dans un second temps, si l'on s'intéresse aux sous-groupes caractérisant les groupes majoritaires décrits précédemment, nous pouvons apprécier l'hétérogénéité à plus petite échelle d'observation. La description des neuf sous-groupes est facilitée par l'examen de leur position respective au sein des trois premiers axes de l'ACP représentant environ 37 % de l'information pour l'axe 1, 32 % pour l'axe 2 et 20 % pour l'axe 3. Seules les représentations graphiques de l'ordination des stations selon les axes 1 et 2 puis 1 et 3 sont représentées ici, elles suffisent à une caractérisation satisfaisante des neuf sous-groupes identifiés. La représentation de l'ordination des stations selon les axes 2 et 3 est en effet redondante avec les deux autres et mettait plus en avant le mélange marqué des différentes classes granulométriques au sens où les groupes les moins marginaux (les moins bien représentés par une classe sédimentaire donnée) étaient les moins bien discriminés les uns des autres.


C'est donc en considérant l'axe 1 de l'analyse que nous pouvons apprécier le mieux le gradient sédimentaire identifié lors de la vision précédente plus globale de la situation. Dans sa partie négative, nous retrouvons un ensemble sédimentaire dominé par les sables moyens. Il est scindé en trois groupes :


 Le premier, dénommé "Sables moyens de type 1" sont des sables moyens propres et sans fraction grossière (sables grossiers et/ou graviers). Il est bien localisé en trois stations proches du banc de Seine pour les deux années prospectées puis quelques stations de ce sous-groupe sont isolées et plus proches de la côte avec une variabilité inter-annuelle plus marquée.


 Le second, dénommé "Sables moyens de type 2" sont des stations dont les sables moyens dominant largement, mais des fractions plus grossières peuvent s'y trouver. Il est bien localisé en 2008 et en 2009 dans la zone proche du Parfond et certaines stations de ce groupe se rencontrent plus à la côte avec une variabilité inter-annuelle également plus prononcée. Il est mieux représenté en 2008 qu'en 2009 au niveau de la zone de dépôts de dragage du Kannick et à l'embouchure.


 Le troisième, dénommé "Sables moyens de type 3" comprend des stations également caractérisées par des sables moyens, mais les sédiments sont moins bien classés et sont bien plus grossiers, comme en témoigne la position moins marginale de ce sous-groupe sur le plan factoriel. Seules deux stations en 2008 et cinq stations en 2009 le composent et sont dispersées au sein du secteur étudié.

Dans la partie positive de l'axe 1, nous pouvons distinguer les sous-groupes de stations les plus marginaux dont les sédiments sont bien plus homogènes (sous-groupes 4, 7, 8 et 9).

 Le sous-groupe 4 est dénommé "Sables fins de type 1". Ces stations représentées par les sables fins propres et sans fraction grossière, sont situées en 2008 comme en 2009 très à la côte le long des côtes du Pays d'Auge et en 2008 à une station proche de la zone de dépôt de dragage du Kannick.

 Le sous-groupe 7 dénommé "Vases" est composé de stations dominées par les vases. Deux stations se situent en 2008 à l'embouchure, et trois stations en 2008 et en 2009 se situent à l'embouchure en Fosses Nord et Sud.

 Le sous-groupe 8 dénommé "Sables grossiers plus ou moins envasés" est composé de stations dominées par les sables grossiers, qui sont ici des sables coquilliers répartis en deux stations en 2008 et une station en 2009 en baie de Seine Sud-orientale. De la vase peut s'y trouver.

 Le sous-groupe 9 dénommé "Hétérogène envasé" est caractérisé ici par la classe des graviers dont la proportion en vase n'est pas négligeable. Les stations de ce groupe sont

essentiellement localisées le long des côtes du Pays de Caux (trois stations en 2008 et en 2009), et une station de ce sous-groupe est également présente en Fosse Nord en 2008.

Parmi les ensembles de stations les moins marginaux figurent les sous-groupes 5 et 6 dénommés (respectivement) les "Sables fins de type 2" et les "Sables fins de type 3". Ces deux sous-groupes sont proches dans leur composition sédimentaire comme en témoigne leur moins bonne discrimination dans l'analyse. Tous deux dominés par les sables fins, ils comportent également, dans une moindre mesure, les autres fractions granulométriques avec une fraction vaseuse plus importante pour les sables fins de type 2.

Les résultats abordés ici, en considérant deux niveaux d'organisation à deux échelles d'observation différentes, semblent ainsi complémentaires. Alors qu'un gradient sédimentaire peut être apprécié spatialement à un niveau d'observation global, une définition des types sédimentaires au sens de cette analyse à une échelle d'observation plus réduite permet d'apprécier l'existence d'une hétérogénéité spatiale plus marquée. C'est notamment le cas des stations les plus à la côte et dominées par les sables fins et les vases. Cette hétérogénéité spatiale est principalement due à l'existence au sein de ces stations d'un mélange des différentes classes granulométriques. Il semble que l'on atteigne ici les limites de la grille d'échantillonnage et descendre à un niveau d'observation plus petit encore serait difficilement interprétable.

## **C. DISCUSSION ET PROPOSITION D'UNE SYNTHÈSE DE L'ORGANISATION SÉDIMENTAIRE DANS LE SYSTÈME "BAIE DE SEINE ORIENTALE – EMBOUCHURE"**

L'objectif est d'offrir une vision synthétique de l'organisation sédimentaire du secteur, en intégrant dans la mesure du possible une part de fonctionnement hydrosédimentaire sous influence anthropique (aménagements, dragages). C'est par le biais de données indicatrices d'événements ou de phénomènes particuliers que nous pouvons aborder cette organisation, en privilégiant une notion d'habitat pour la faune qui soit intégrée dans un contexte hydrodynamique et anthropique, que nous connaissons comme fort en baie de Seine Orientale.

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

Les nombreuses données acquises concernant la nature tout comme la texture des sédiments nécessitent d'être synthétisées pour rendre compte de l'organisation sédimentaire du secteur étudié. Plusieurs approches synthétiques traitant des données granulométriques ont été présentées, et permettent de rendre compte de l'organisation sédimentaire selon différents points de vue, en fonction de la plus ou moins prise en compte de certaines classes sédimentaires. Une

approche basée sur l'étude de la texture sédimentaire a apporté des informations cohérentes et complémentaires aux analyses effectuées sur les données de granulométrie.

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 propres à chaque classification.

L'ordination des stations par ACP a conduit à un constat similaire et le gradient des sables moyens du large vers les vases à la côte est également mis en avant à une échelle d'observation globale. Cependant cette technique se montre moins subjective (ne prédéfinissant pas de géofaciès types) et a ainsi permis de regrouper des stations par rapport à leurs ressemblances au sein du gradient identifié. La difficulté à caractériser nettement les sous-groupes de stations les moins marginaux dans l'analyse ACP témoigne de l'emboîtement des différentes fractions granulométriques. Ainsi, le gradient n'est pas net et est caractérisé par une zone côtière (notamment en baie de Seine Nord-orientale, à l'embouchure, et de façon plus marquée en baie de Seine Sud-orientale) où tous les mélanges semblent possibles.

La Figure 99 synthétise la distribution spatiale des différentes fractions granulométriques et illustre bien cette notion d'emboîtement.

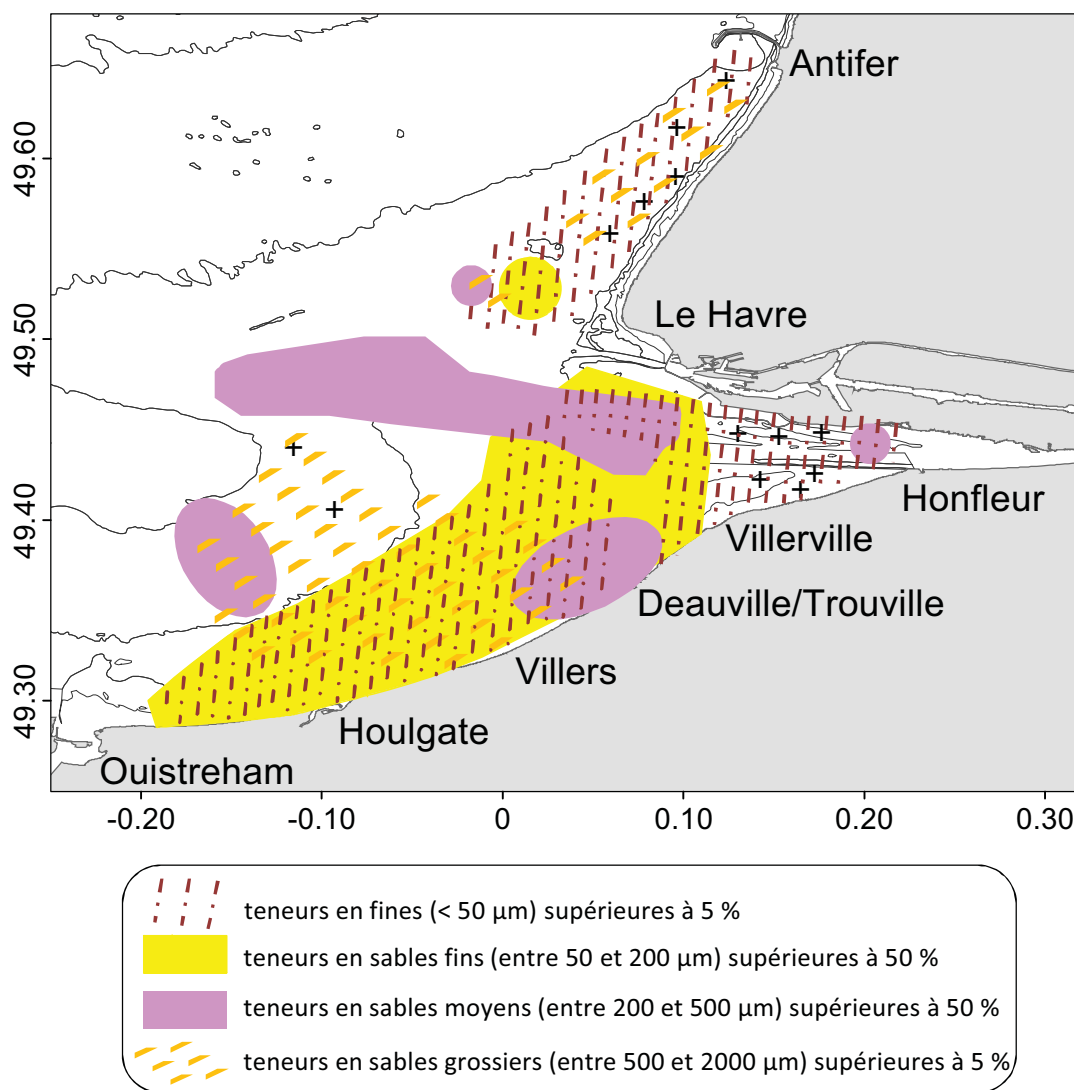


Figure 99: Schéma synthétique (COLMATAGE 2008-2009) du recouvrement spatial de quatre des classes granulométriques prises en compte. Les zones représentent les teneurs maximales des différentes classes granulométriques retenues : teneurs en fines (< 50 µm) supérieures à 5 %, teneurs en sables fins (entre 50 et 200 µm) supérieures à 50 %, teneurs en sables moyens (entre 200 et 500 µm) supérieures à 50 %, teneurs en sables grossiers (entre 500 et 2000 µm) supérieures à 5 %, teneurs en graviers (> 2000 µm) supérieures à 10 %.

L'analyse texturale des sédiments a montré, de façon cohérente et complémentaire, que ce gradient s'accompagne d'une complexification de la structure sédimentaire. Si l'ACP a montré, en ces zones, que les sédiments pouvaient être en mélange, l'analyse texturale des sédiments a mis en avant qu'il n'était pas homogène. 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, comme évoqué précédemment, 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 a montré que c'était 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.




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

Cette discussion 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 100). 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.

Comme vu précédemment, 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.

Tout d'abord, si l'on compare l'organisation sédimentaire actuelle avec la carte des courants maximums de marées (Figure 16), nous pouvons constater une certaine cohérence avec le constat d'un affinement sédimentaire lié à la diminution de l'intensité des courants de marée évoqué précédemment. En effet, 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 : i) des zones très localisées en baie de Seine Sud-orientale, ii) la baie de Seine Nord-orientale et iii) l'embouchure.


 Si c'est à l'embouchure que l'on observe les plus fortes teneurs en vases, elle est également le lieu de fortes contraintes hydrodynamiques (courants maximums de marée supérieurs à  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ ), liées à la morphologie des fonds et à sa configuration particulière relative aux aménagements. La persistance de la fraction vaseuse dans cette zone témoigne des apports massifs qui se produisent lors des crues de la Seine, rendant possible leur compaction et limitant ainsi leur remise en suspension (Lesourd, 2000). Or, nous avons pu remarquer, au travers de l'examen des photographies des sédiments, que ces vases sont fortement compactées et ne constituent pas des apports récents en provenance de la Seine. De plus, la dernière crue significative (apports sédimentaires massifs par des débits de crue prolongés dans le temps) a eu

lieu il y a environ une dizaine d'années, en 2001, et il n'y a pas eu depuis d'apports massifs de ces fines.


Ce sont les effets conjugués des fortes contraintes hydrodynamiques, des opérations de dragage des fonds et du manque de recharge sédimentaire en provenance de la Seine qui expliquent la situation actuelle à l'embouchure interne. Ce constat n'aurait pas pu être fait sans considération de la texture sédimentaire. En effet, la présence de ces vases noires compactes anciennes témoigne aujourd'hui des importants apports qui se sont produits lors des crues significatives dans le passé. Leur structure en démantèlement rend compte à la fois i) des conditions hydrodynamiques et anthropiques fortes caractérisant cette zone ii) et/ou des dragages réguliers de ces fonds. Les forts pourcentages de vase observés en 2008 à l'embouchure, sur la base de la grille d'échantillonnage de COLMATAGE, ne peuvent être attribués à une décharge sédimentaire liée à une crue récente.

Cependant une grille d'échantillonnage plus resserrée, comme celle utilisée pour construire la carte de répartition des sédiments de la situation 2008-2009 (Figure 30), a identifié l'existence de décharges réduites, localisées dans l'embouchure, accolées aux bancs du Ratier et des Ratelets. Si les cartes de distribution spatiale de la présence de vase fluide en surface en 2008 et en 2009, sur la base de la grille d'échantillonnage de COLMATAGE (Figure 91), rendent également compte de ces décharges sédimentaires, la grille d'échantillonnage n'est certainement pas assez fine pour rendre bien compte de la sédimentation des vases en périphérie des bancs de sables. Seules les stations 15 et 16 peuvent être les témoins de ce processus particulier de sédimentation, elles enregistrent en effet entre 10 et 25% de fines en 2009 et la station 15 échantillonnée en 2008 également. La présence de ces vases face au débouché en mer, en prolongement du banc des Ratelets n'avait pas été détectée à partir de la grille d'échantillonnage de PECTOW au niveau de la station 8, la plus proche de ces points. Cependant, ces processus de sédimentations en périphérie des bancs sableux, comme déjà identifiés dans Lesueur *et al.* (1997) et Lesourd (2000) (Figure 33) ou modélisés dans Le Hir *et al.* (2001) (Figure 34), semblent être cantonnés à une profondeur relativement précise, aux alentours des 5 m (Lesourd, 2000). Or la station 8 de la grille d'échantillonnage de PECTOW est située plus en aval des stations 15 et 16 de COLMATAGE et ne doit pas encore, malgré la connaissance de la progradation des bancs de sables, être impactée par ce processus. Alors que, par les images obtenues des campagnes PECTOW, on observe la persistance des vases en face de la Fosse Nord, elles ne sont pas retrouvées en 2008-2009. Cela repose encore une fois la question du positionnement des stations, face à ces processus majeurs régis à petite échelle spatiale. Les stations 13 et 35 sont positionnées sur la zone ensablée du dépôt de dragage du Kannick alors que les stations A, E, 90 et 91 du suivi PECTOW sont positionnées autour de cette zone ensablée. Ces constats reposent

ici la question de la stratégie d'échantillonnage pour comprendre l'organisation et le fonctionnement du compartiment benthique au sein d'un tel système.

 Le secteur nord-oriental de la baie de Seine, le long des côtes du Pays de Caux, est également concerné par cette contradiction. Il est en effet soumis à des courants maximums de marée élevés (supérieurs à  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ ), atteints au flot par le courant de Verhaule, alors que des teneurs importantes en vase y sont observées. Si dans cette zone, la présence de ces vases peut être attribuée à des apports en provenance de la Seine (Figure 26, Figure 91), les quantités déposées sont plus à relier aux apports massifs issus des rejets de dragage du GPMH sur la zone de dépôt d'Octeville.

Ainsi, tout comme dans l'embouchure, les courants de marée ne sont pas suffisants pour disperser ces quantités, qui ont le temps en partie de se compacter rendant plus difficile leur remise en suspension (Lesourd, 2000). De plus, leur maintien dans la zone pourrait également être favorisé par (i) la proximité de la digue du terminal pétrolier d'Antifer (Figure 39 ; Crevel, 1985) et (ii) la présence d'un courant anticyclonique caractéristique de la circulation générale des eaux à l'échelle de la baie de Seine (Figure 12 ; Le Hir et *al.*, 1985).

 En baie de Seine Sud-orientale, la diminution des vitesses maximales des courants de marée favorise la présence des sables fins envasés. La modélisation des zones préférentielles de dépôts de fines de la Figure 26 (Cugier, 1999) et la présence de vase fluide sur les échantillons récoltés au cours des campagnes COLMATAGE (Figure 91) confortent ce constat.

Cependant, les stations situées en face de Deauville sont moins caractérisées par ces sédiments fins. Elles comportent en revanche une plus forte teneur en sables moyens, tout comme les stations au large du secteur soumises à des courants de marée plus intenses. Retrouver cette fraction sédimentaire en face de Deauville témoigne de contraintes hydrodynamiques locales relativement fortes, à relier à l'action des vagues sur des faibles profondeurs comme en témoigne les modélisations de Le Hir et *al.* (2001) de la Figure 17. Nous avons pu remarquer une augmentation des teneurs en sables moyens au cours du temps dans cette zone. Il est possible que la jetée protégeant la marina de Port-Deauville, construite dans les années 1970, puisse créer un terrain favorable à l'accumulation de sables et donc à une diminution des profondeurs. Hinschberger (1996) évoquait déjà un engraissement de la plage à l'ouest de Deauville. Cette zone serait alors de plus en plus soumise aux contraintes hydrodynamiques et les sédiments les plus fins n'y tiendraient plus.

Une autre zone en face de Villers est également moins bien représentée par ces sédiments fins, mais on y trouve une quantité non négligeable de sables grossiers, voire même des fragments coquilliers de diamètre supérieur à 2 mm. Dans Garnaud (2003), ce secteur exploré au sonar à balayage latéral avait permis l'identification d'un réseau de sillons ramifiés et ornés de

mégarides d'une hauteur comprise entre 10 et 20 cm, entre 6 m et 10 m de fond. Cette morphologie particulière était caractérisée par des sédiments grossiers à moyens en contact érosif sur des argiles reliques. Ces sédiments grossiers ne sembleraient pas se déplacer mais une couverture de sables fins et de vases peut exister, peut être piégée au creux des rides, et représente la couverture mobile. Des formations en mégarides composées de sables moyens à grossiers sur lesquelles peuvent transiter des sables fins ont aussi été identifiés au nord-est d'Ouistreham. D'après Garnaud (2003), ces formations seraient à relier à l'influence des courants de marée intenses en provenance du Parfond en période de flot et/ou à l'influence de la houle lors des tempêtes. Caractérisée par des apports estuariens (en quantité variable en relation avec les crues estuariennes) en constante remobilisation par les agents hydrodynamiques, cette zone envasée avait alors été nommée "vasière subtidale temporaire" (Garnaud, 2003).

Nous pouvons remarquer, malgré le caractère facilement remobilisable des vases et les fortes contraintes auxquelles elles sont soumises, qu'elles sont particulièrement bien représentées depuis plusieurs décennies au nord-ouest de Deauville et au nord-est d'Ouistreham (Figure 31). Il est possible que ces "spots" envasés soient favorisés en raison de leur proximité des fleuves côtiers de l'Orne (Ouistreham) et de la Touques (Deauville/Trouville), sources de matériaux fins. Mais leur présence doit aussi être liée à des conditions hydrodynamiques particulièrement favorables : tout comme les vases se déposent préférentiellement, selon un processus hydro-sédimentaire localisé en "pieds de bancs" à l'embouchure, il est possible que les vases s'accumulent préférentiellement au nord-ouest de Deauville en réponse à des contraintes hydrodynamiques plus réduites. Il est possible que l'ensablement observé ainsi qu'une remontée des fonds en face de Deauville aient un rôle à jouer dans la création en périphérie, d'une zone préférentielle d'accumulation de matériaux fins. Aussi, l'envasement de la zone entre Cabourg et Ouistreham serait (i) favorisé par l'existence d'un tourbillon anticyclonique s'exprimant à l'échelle du système "Manche – baie de Seine", mais aussi (ii) exacerbé par la proximité de la zone de dépôt de dragage d'Ouistreham.

La baie de Seine Sud-orientale est donc à la fois une zone privilégiée d'accumulation de matériaux fins où les forçages hydrodynamiques variés et intenses peuvent s'exprimer à des échelles spatio-temporelles multiples.

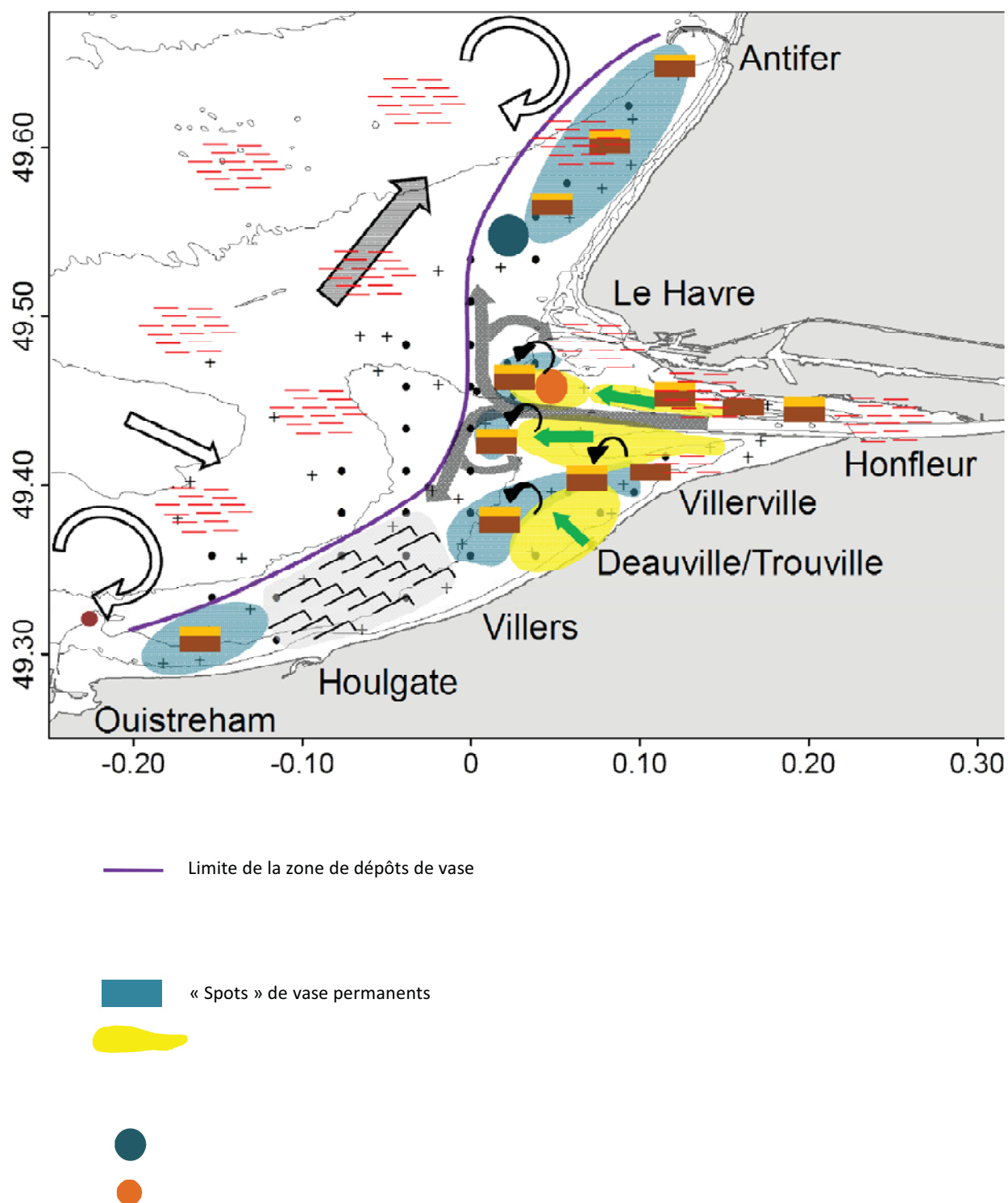


Figure 100 : Schéma synthétique et simplifié de l'organisation sédimentaire dans le contexte hydrodynamique et anthropique du système " baie de Seine Orientale - embouchure ". Se référer au texte pour explications.

### 3. 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 complexe. Au regard des connaissances et des résultats nouvellement acquis, notamment sur l'étude de la texture sédimentaire, nous pouvons aisément 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. Nous pouvons alors retrouver au sein même d'un répliat des espèces dont les affinités sédimentaires sont théoriquement différentes. De plus, l'hétérogénéité horizontale qui se fait ressentir entre les répiats d'une même station peut amener à un résultat similaire.

Il semble 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 répliat supplémentaire à ceux réalisés pour analyse faunistique. De plus, nous avons pu apprécier l'importance de l'hydrodynamisme sur la distribution, la texture et la dynamique sédimentaire. Ces facteurs doivent sérieusement être considérés si nous voulons 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.

Dans la suite de ce travail, l'étude des relations benthos sédiments intégrera donc cet aspect de l'organisation sédimentaire. Il est à noter que si le simple visionnage de photographie ne permet pas d'obtenir un jeu de données basé sur un protocole d'une grande précision scientifique, et que cela peut être critiquable, il n'en reste pas moins perfectible et constitue un moyen d'apporter des informations complémentaires pertinentes ayant trait à une réalité de terrain. Les connaissances antérieurement et nouvellement acquises seront intégrées dans les discussions ayant trait à l'étude de l'évolution à long terme du compartiment "macrobenthos – sédiments" ainsi qu'à la compréhension de son organisation.



## II. CARACTERISTIQUES ET ORGANISATION DE LA MACROFAUNE BENTHIQUE EN RELATION AVEC SON ENVIRONNEMENT HYDRO-MORPHO-SEDIMENTAIRE COMPLEXE

### A. LES ESPECES RENCONTREES : CAMPAGNES COLMATAGE 2008 - 2009

Comme vu précédemment, les deux campagnes COLMATAGE 2008 et 2009 n'ont pas bénéficié d'un effort d'échantillonnage (nombre de stations échantillonnées) et d'analyse faunistique (nombre de réplicats analysés) identiques.

Une liste des espèces rencontrées lors de ces deux campagnes est dressée en Annexe 1 de ce rapport. Pour ne pas compliquer les comparaisons, il a été choisi de ne pas faire figurer dans cette liste les espèces qui ont été récoltées uniquement : (i) au sein des cinquième réplicats en 2008, (ii) dans le chenal de navigation entre les deux digues submersibles non revisité en 2009 et (iii) au sein des autres stations qui n'ont pas pu être ré-échantillonnées en 2009. La liste de ces espèces est néanmoins commentée dans les paragraphes suivants.

#### *a. Sur la base d'un échantillonnage unique en 2008*

##### *i. Les cinquièmes réplicats*

Seules deux espèces supplémentaires ont été rencontrées grâce au cinquième répliat en 2008, un décapode à la station 43 VV5 qui n'a pas été déterminé jusqu'à l'espèce en raison de son mauvais état de conservation, puis un amphipode *Sthenothoe marina* à la station 17 VV5. Ces espèces ne figurent donc pas sur la liste faunistique de l'Annexe 1.

##### *ii. Le chenal de navigation*

Toujours pour rendre les comparaisons possibles, 11 espèces retrouvées uniquement dans les stations non revisitées en 2009 ne sont pas recensées dans cette liste. Ces espèces ont toutes été échantillonnées entre les digues submersibles en 2008, il s'agit des annélides polychètes *Alita sucinea*, *Microphthalmus sczelkowi*, *Hediste diversicolor* et *Polydora ligérica*, du décapode *Pilumnus hirtellus*, des amphipodes *Bathyporeia pilosa*, *Jassa marmorata*, *Leptocheirus pilosus* et un gammaridé (probablement *Gammarus zaddachi*), des Caprellidae *Caprella linearis* et *Caprella mutica*.

Parmi ces espèces *Polydora ligérica* et *Leptocheirus pilosus* étaient abondantes dans un bloc bioturbé à la station 57, sur un répliat supplémentaire, et une *Hediste diversicolor* y était présente. La station 51 se caractérisait par les plus fortes abondances avec 253 *Microphthalmus sczelkowi*, 43 *Alita sucinea*, 35 gammaridés et la station 58 comportait 41 *Caprella mutica*, espèce qui n'avait pas encore été recensée dans cette zone.

Naturellement rencontrée au sein des eaux côtières des secteurs sub-boréaux en Asie du Nord-est, le caprellidé *Caprella mutica* a été introduite en Amérique du Nord (Côtes Pacifique) de manière accidentelle en liaison avec l'huître japonaise, puis recensée pour la première fois en Angleterre en 2000 dans une aquaculture de Scotland (Willis et *al.*, 2004). Elle est probablement arrivée en Europe par le biais de l'activité d'aquaculture ou par transport maritime. Cette espèce vit dans des milieux diversifiés artificiels comme les bouées et cordes d'amarrage, coques de bateaux, pontons flottants, et souvent en association avec les hydraires et les algues. Sur les côtes ouest de l'Ecosse, ce Caprellidé peut atteindre les 300 000 ind. / m<sup>2</sup> (Cook et *al.*, 2007).

La présence de certaines de ces espèces à affinité estuarienne comme *Leptocheirus pilosus* (Goodhart, 1939) témoigne des plus fortes variations de salinité dans ce chenal de navigation.

### **iii. Les autres stations non ré-échantillonnées**

La suppression des stations 43 et 50 n'a pas affecté le nombre d'espèces recensées. La suppression des stations 49 et 52 entraîne (respectivement) la perte d'un *Bathyporeia pilosa* et d'un *Alita sucinea*. Ces espèces étaient également présentes dans le chenal de navigation.

## **b. Sur la base d'un effort d'échantillonnage commun**

### **i. Espèces communes aux deux années échantillonnées**

Au terme du dépouillement des campagnes automnales COLMATAGE 2008 et 2009, sur la base de 4 réplicats et des 48 stations communes aux deux années, un total de 204 espèces a été rencontré. La Figure 101 synthétise l'évolution du nombre d'espèces rencontrées au cours de ces campagnes.

Sur les 204 espèces identifiées à partir du dépouillement des 48 stations communes échantillonnées en 2008 et en 2009 et à raison de 4 réplicats par station, 193 ont été rencontrées en 2008 contre 175 en 2009. 167 des espèces rencontrées sont communes aux deux campagnes, ce qui représente environ 80 % du nombre d'espèces total.

On remarque que seul 15 % des espèces rencontrées en 2008 n'ont pas été récoltées en 2009 et que seulement 6 % des espèces rencontrées en 2009 n'ont pas été récoltées en 2008. Ces résultats suggèrent une grande stabilité inter-annuelle (2008-2009) de la composition spécifique au sein du système "baie de Seine Orientale – embouchure".

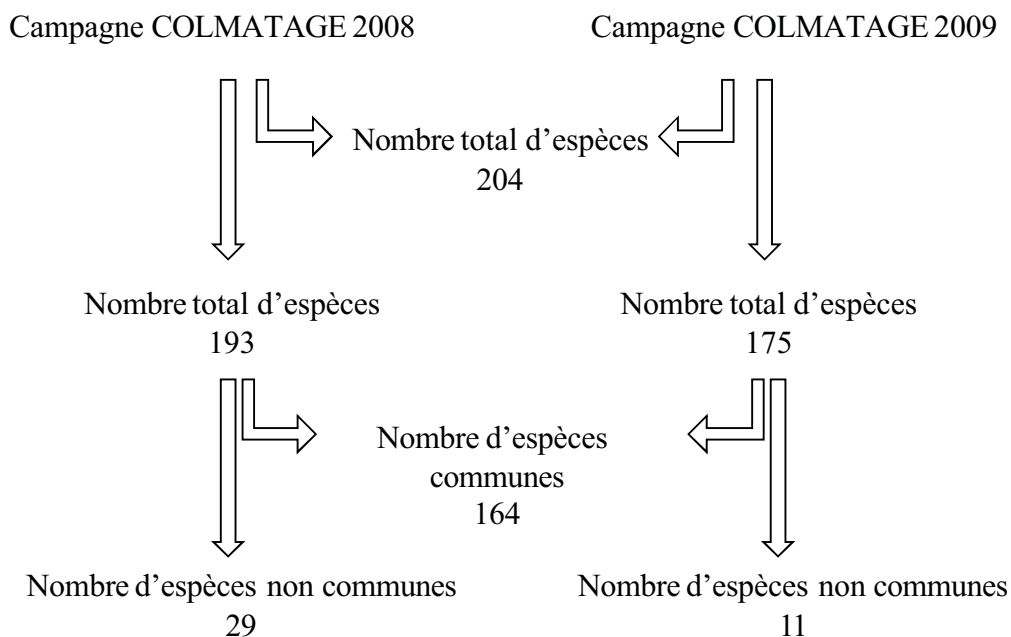


Figure 101 : Evolution du nombre d'espèces recensées lors des campagnes automnales COLMATAGE 2008 et 2009, sur la base des stations communes entre les deux années (48 stations et 4 réplicats par station).

## ii. Espèces rencontrées uniquement en 2008

Les espèces rencontrées uniquement en 2008 sont pour la plupart des espèces rares et de petite taille, leurs abondances varient de 1 à 20 individus répartis sur 1 ou 6 stations.

On remarque que la majorité de ces espèces peuvent être retrouvées plus communément sur les fonds de graviers plus ou moins ensablés situés plus au large comme l'échinoderme *Ophiothrix fragilis*. Il s'agit probablement de recrutements sporadiques de larves apportées depuis le large puisqu'aucune population véritable n'est établie.

## iii. Espèces rencontrées uniquement en 2009

Parmi les espèces rencontrées uniquement en 2009 figure le décapode *Asthenognathus atlanticus*, espèce nouvelle pour le secteur de la baie de Seine Orientale depuis l'hiver 2008. Ce décapode de petite taille (environ 1 cm adulte) est commun dans les fonds sablo-vaseux et vaseux des côtes Atlantique françaises depuis le sud du golfe de Gascogne jusqu'en baie de Morlaix.

Deux spécimens, des femelles adultes, ont été récoltés aux stations 6 et 31 en 2009. Leur présence a été confirmée les années suivantes au cours de différentes campagnes d'échantillonnage, dont la campagne PECTOW 2011 (Figure 102). La présence nouvelle de cette espèce dans la zone, notamment dans le secteur du Pays de Caux entre le Cap de la Hève et

Antifer, pourrait être un signe d'un envasement en baie de Seine Orientale et a fait l'objet d'une note (Jourde et *al.*, soumis).

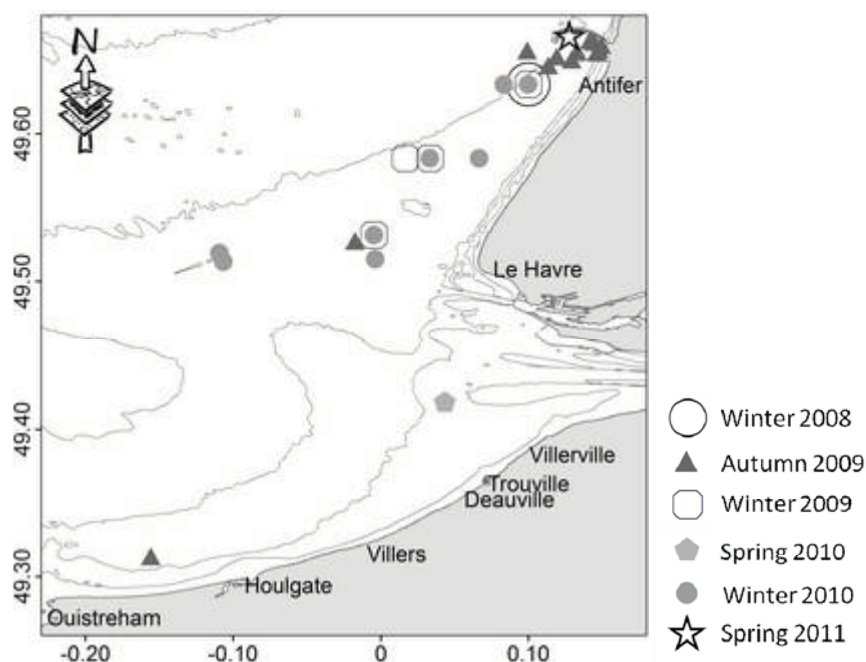


Figure 102 : Carte de répartition des sites où a été récolté le décapode *Asthenognathus atlanticus* en baie de Seine Orientale depuis sa première apparition en 2008 jusqu'en 2011 (Jourde et *al.*, soumis).

Les autres espèces sont majoritairement des amphipodes et des espèces de petite taille. Ce sont des espèces rares pour la plupart qui ne semblent pas apporter d'information particulière, leurs abondances varient de 1 à 10 individus et se répartissent sur 1 à 5 stations.

## B. RICHESSES SPECIFIQUES ET ABONDANCES

### 1. Distribution spatiale des richesses spécifiques (esp. / 0.4 m<sup>2</sup>)

#### a. Campagnes COLMATAGE (2008-2009)

Les valeurs de richesses spécifiques se montrent spatialement et temporellement stables entre les deux années prospectées (Figure 103), ce qui laisse présager une forte structuration de cet indice par les facteurs environnementaux.

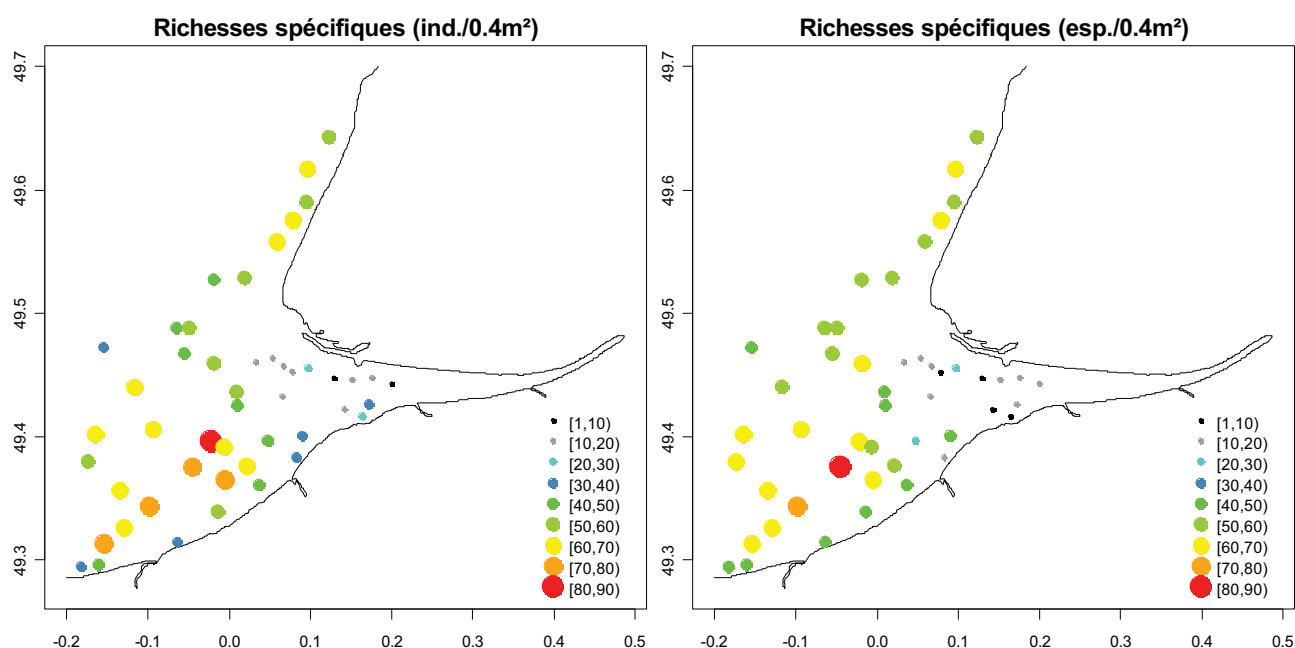


Figure 103: Distribution spatiale des richesses spécifiques (esp. / 0.4 m<sup>2</sup>) dans les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite).

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.

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.

Le Tableau 6 présente les dix espèces les plus courantes pour les deux années prospectées, elles se répartissent sur plus de 70 % des stations échantillonnées. Parmi elles, six sont retrouvées chaque année, témoignant d'une stabilité inter-annuelle spécifique des espèces les plus courantes. C'est le cas de *Nephtys hombergii* et *Abra alba* dont les valeurs d'abondance sont restées stables entre les deux années et occupant plus de 80 % des stations, puis le cas de *Magelona johnstoni*, *Pectinaria koreni*, *Lanice conchilega* et des individus du genre *Pholoe*, dont les abondances ont fortement diminué en 2009.

Tableau 6 : Classement des 10 espèces les plus courantes sur la base de l'échantillonnage commun de COLMATAGE 2008 (haut) et 2009 (bas). Les valeurs et rangs d'abondance de ces espèces sont précisés et les valeurs correspondantes au nombre de stations occupées et aux abondances (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) sont converties en pourcentages (respectivement) du nombre total de stations et de l'abondance totale.

COLMATAGE 2008					
Taxons	Stations occupées		Abondance totale		
	(nombre)	(pourcentage)	(ind. / 0.4 m <sup>2</sup> )	(pourcentage)	(rang)
<i>Abra alba</i>	44	91.67	8461	5.87	4
<i>Nephtys hombergii</i>	43	89.58	1134	0.79	20
<i>Magelona johnstoni</i>	42	87.50	11118	7.71	3
<i>Spiophanes bombyx</i>	39	81.25	1556	1.08	15
<i>Lagis koreni</i>	38	79.17	2485	1.72	10
<i>Lanice conchilega</i>	37	77.08	371	0.26	36
<i>Pholoe</i> <sup>(Genre)</sup>	35	72.92	2985	2.07	8
<i>Eteone longa</i>	35	72.92	854	0.59	23
<i>Owenia fusiformis</i>	34	70.83	55918	38.80	1
<i>Tubulanus polymorphus</i>	34	70.83	1381	0.96	17

COLMATAGE 2009					
Taxons	Stations occupées		Abondance totale		
	(nombre)	(pourcentage)	(ind. / 0.4 m <sup>2</sup> )	(pourcentage)	(rang)
<i>Nephtys hombergii</i>	42	87.50	1330	1.87	9
<i>Abra alba</i>	38	79.17	8507	11.99	3
<i>Magelona johnstoni</i>	38	79.17	4785	6.75	4
<i>Kurtiella bidentata</i>	37	77.08	2548	3.59	7
<i>Pholoe</i> <sup>(Genre)</sup>	37	77.08	1042	1.47	14
<i>Lagis koreni</i>	37	77.08	855	1.21	19
<i>Chaetozone gibber</i>	35	72.92	2798	3.94	5
<i>Lanice conchilega</i>	35	72.92	1181	1.66	12
<i>Nephtys cirrosa</i>	34	70.83	642	0.90	22
<i>Eumida bahusiensis</i>	34	70.83	401	0.57	26

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

En Annexe 11 (11/A) figurent les cartes de distribution des valeurs de richesse spécifique au sein de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni*, obtenues à l'issu des campagnes d'échantillonnage du suivi PECTOW.

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. Malgré ces quelques exceptions que l'on peut considérer comme locales à l'échelle de la communauté, il n'y a pas, à cette échelle, de structuration spatiale contrastée qui soit stable dans le temps.



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.

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

### a. Campagnes COLMATAGE (2008-2009)

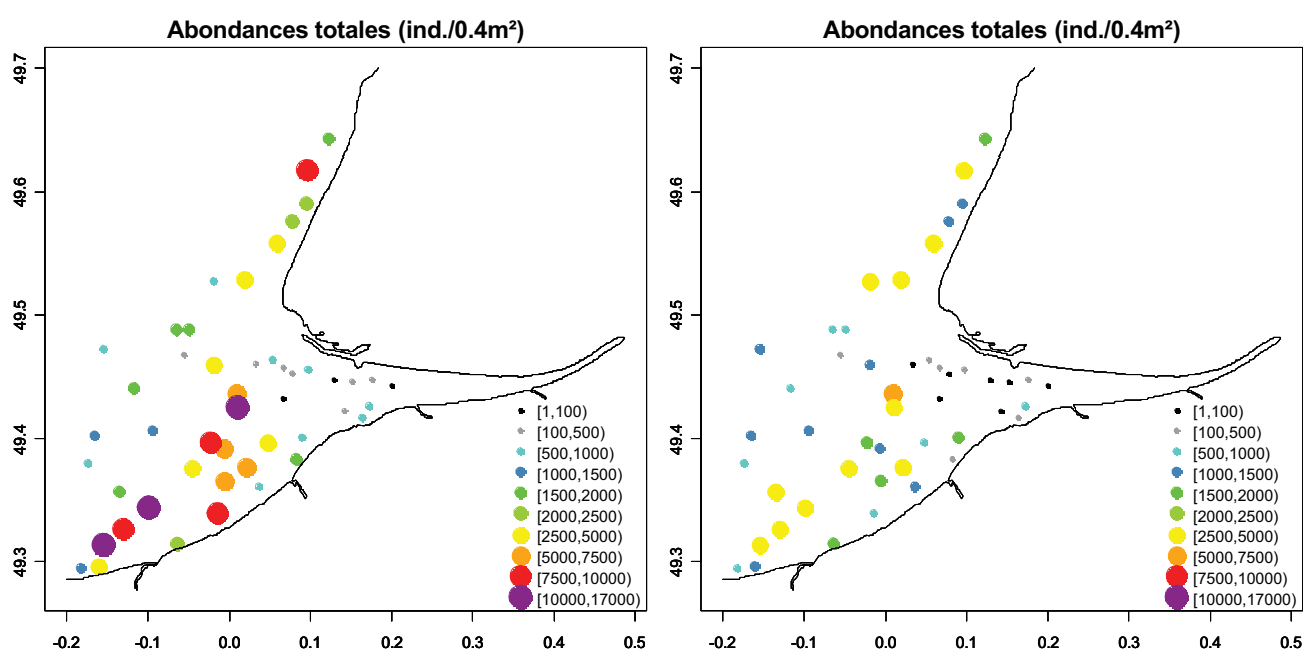


Figure 104 : Distribution spatiale des abondances (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) dans les fonds subtidiaux de la baie de Seine Orientale en septembre 2008 (gauche) et en septembre 2009 (droite).

Sur la base de l'échantillonnage commun (48 stations), un total de 144 135 individus a été comptabilisé pour l'année 2008 et 70 941 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 104) 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.

Le Tableau 7 présente les dix espèces les plus dominantes, représentant chaque année environ 80 % de l'abondance totale. Sept d'entre elles sont communes aux deux années échantillonnées. Parmi ces espèces communes, *Owenia fusiformis*, *Magelona johnstoni*, *Chaetozone gibber*, *Ampharete baltica* et *Magelona fusiformis* sont caractérisées par de fortes diminutions de leurs abondances en 2009 alors qu'*Aphelochaeta marioni* voit ses abondances augmenter. Quant à *Abra alba*, elle ne montre pas de variations de ses effectifs entre les deux années prospectées. Ainsi, la baie de Seine Orientale, comme auparavant observé, est caractérisée par la dominance d'un petit nombre d'espèces abondantes.

Tableau 7 : Classement des 10 espèces les plus abondantes sur la base de l'échantillonnage commun de COLMATAGE 2008 (haut) et 2009 (bas). Le nombre de stations occupées par ces espèces sont précisés et les valeurs correspondantes aux abondances (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) et au nombre de stations occupées sont converties en pourcentages (respectivement) de l'abondance totale et du nombre total de stations.

COLMATAGE 2008					
Taxons	Abondance totale			Stations occupées	
	(ind. / 0.4 m <sup>2</sup> )	(pourcentage)	(rang)	(nombre)	(pourcentage)
<i>Owenia fusiformis</i>	55918	38.80	1	34	70.83
<i>Aphelochaeta marioni</i>	11313	7.85	2	26	54.17
<i>Magelona johnstoni</i>	11118	7.71	3	42	87.50
<i>Abra alba</i>	8461	5.87	4	44	91.67
<i>Chaetozone gibber</i>	7309	5.07	5	29	60.42
<i>Ampharete baltica</i>	5885	4.08	6	29	60.42
<i>Magelona filiformis</i>	3650	2.53	7	29	60.42
<i>Pholoe</i> <sup>(Genre)</sup>	2985	2.07	8	35	72.92
<i>Caulleriella alata</i>	2666	1.85	9	31	64.58
<i>Lagis koreni</i>	2485	1.72	10	38	79.17

COLMATAGE 2009					
Taxons	Abondance totale			Stations occupées	
	(ind. / 0.4 m <sup>2</sup> )	(pourcentage)	(rang)	(nombre)	(pourcentage)
<i>Aphelochaeta marioni</i>	14856	20.94	1	32	66.67
<i>Owenia fusiformis</i>	9475	13.36	2	31	64.58
<i>Abra alba</i>	8507	11.99	3	38	79.17
<i>Magelona johnstoni</i>	4785	6.75	4	38	79.17
<i>Chaetozone gibber</i>	2798	3.94	5	35	72.92
<i>Magelona filiformis</i>	2758	3.89	6	28	58.33
<i>Kurtiella bidentata</i>	2548	3.59	7	37	77.08
<i>Tubulanus polymorphus</i>	1350	1.90	8	30	62.50
<i>Nephtys hombergii</i>	1330	1.87	9	42	87.50
<i>Ampharete baltica</i>	1290	1.82	10	31	64.58

### **b. Variabilité inter-annuelle (2008-2009) du recrutement d'espèces dominantes**

C'est en collaboration avec Thomas Anquez (dans le cadre de son stage de M1, 2011) que nous nous sommes intéressés à la variabilité spatiale et inter-annuelle du recrutement de quatre espèces abondantes de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni*. Les données de biométries effectuées sur *Owenia fusiformis*, *Abra alba*, *Pectinaria koreni* et *Phaxas pellucidus* ont servi à estimer la part d'individus juvéniles et d'individus de plus de un an dans les échantillons. L'objectif était double : (i) identifier les cohortes ou les classes d'âge de ces quatre espèces d'après ces données biométriques, et (ii) caractériser leur distribution spatio-temporelle sur l'aire échantillonnée.

Face au problème d'imbrication des cohortes identifiées sur les histogrammes des fréquences de taille de chaque population étudiée, il a été choisi de déterminer les différentes cohortes sous R en utilisant les fonctions *mix()* (Macdonald et Green, 1988) et *mixparam()* disponibles dans le paquet {mixdist} (Macdonald et Du, 2011). Les modèles ont été paramétrés pour chaque espèce en fonction de leur propre taux de croissance et périodes de recrutement, ainsi que des classes de tailles prises en compte. Ces informations ont été extraites de la bibliographie de Thiébaud (1994) pour *Owenia fusiformis*, Dauvin (1986) pour *Abra alba*, Lambert (1991) pour *Pectinaria koreni* et Gentil (1986) pour *Phaxas pellucidus*. Cette méthode a permis d'obtenir une estimation de la proportion d'individus issus du recrutement de l'année en cours (juvéniles de moins d'un an). Dans le cas de stations présentant de nombreux individus cassés, les relations allométriques issues des données de mesures de COLMATAGE 2008 et 2009 ont été utilisées. Les histogrammes de fréquences des classes de taille ainsi que les cohortes modélisées figurent en Annexe 6, et les cartes de distribution spatiale des individus de moins d'un an et de plus d'un an pour chaque espèce étudiée figurent en Annexe 7.

La méthode utilisée a modélisé les cohortes avec succès et les résultats obtenus se sont montrés très cohérents.

L'étude de la distribution spatiale des différentes classes d'âge modélisées a montré que pour *Owenia fusiformis*, *Abra alba* et *Phaxas pellucidus*, les individus nouvellement recrutés étaient répartis de manière plus étalée que les individus plus âgés. Ce constat laisse présager de conditions environnementales difficiles pour les jeunes individus, rejoignant ainsi les conclusions d'études antérieures.

Elles avaient en effet mis en avant la forte diminution des taux de recrues dans les premiers mois suivant leur fixation, en relation avec la nature sédimentaire. Alors que les travaux d'Olivier (1997), menés expérimentalement, avaient montré que les taux de survie des recrues étaient considérablement réduits après 52 jours de survie sur des sables fins à moyens propres chez *Owenia fusiformis*, Dauvin (1992) avait montré que suite au recrutement, les juvéniles se

maintenaient en densités notables, uniquement dans les sables fins plus ou moins envasés, et disparaissent totalement des sables moyens propres après trois mois. Notre étude a montré qu'en baie de Seine Sud-orientale, *Abra alba* et *Owenia fusiformis* montrent les mêmes tendances avec un recrutement massif et étalé, localisés préférentiellement au nord-est d'Ouistreham et au nord-ouest de Deauville. La distribution des "noyaux" d'individus de plus de un an est réduite au sein de ces zones préférentielles de recrutement, de façon similaire à la distribution des zones préférentielles d'accumulation des particules fines. Seulement, il n'est pas forcément clairement établi que ces espèces préfèrent les sédiments envasés aux sédiments sableux.

En effet, si d'autres études avaient mis en relation une forte mortalité des recrues en relation avec les contraintes hydrodynamiques, conférant aux sédiments en transit un rôle abrasif néfaste à leur survie (Armonies, 1994 ; Olivier et *al.*, 1996a ; Elmgren et *al.*, 1986 ; Bouma et *al.*, 2001), nous pouvons également deviner l'influence néfaste des conditions environnementales particulières entre Villers et Houlgate au travers de l'étude précédente. Comme nous l'avons vu, cette zone est soumise à des contraintes hydrodynamiques fortes qui pourraient expliquer, plus que la nature sédimentaire, le resserrement des "noyaux" d'abondance en cours d'année.

Il est à noter que si un resserrement des "noyaux" d'abondance est clairement observé en baie de Seine Sud-orientale, pour ces trois espèces, ce n'est pas le cas en baie de Seine Nord-orientale pour *Owenia fusiformis*. Les plus fortes abondances observées, notamment en deux stations proches d'Antifer, n'est pas à relier à un recrutement mais à la présence d'individus de plus de un an. Ainsi, pour ces deux années, le recrutement de cette espèce n'a pas été un succès dans cette zone.

Ce phénomène de resserrement des noyaux d'abondance est également observé chez *Phaxas pellucidus*. Cependant, si les zones préférentielles de recrutement de cette espèce semblent similaires, ou tout du moins en partiel recouvrement avec celles d'*Abra alba* et d'*Owenia fusiformis*, la position des "spots" d'abondance des individus de plus de un an est décalée vers le large, vers les zones moins envasées. Ce résultat rejoint ceux de Thiébaud (1994) et Barnay (2003) qui avaient identifié une répartition plus au large de cette espèce.

Concernant *Pectinaria koreni*, sa durée de vie d'un an ne permet pas ici de juger des contraintes éventuelles exercées au sein de l'aire de distribution des noyaux d'abondances des stades jeunes. Cependant, nous pouvons remarquer que son aire de distribution est dans l'ensemble décalée vers l'embouchure par rapport aux autres espèces.

Les moyennes de taille des individus nés dans l'année ont été estimées pour chaque espèce et pour chaque station, les résultats ont montré que pour les quatre espèces étudiées, ces moyennes sont plus élevées en baie de Seine Sud-orientale. En ce qui concerne *Owenia fusiformis*, *Abra alba* et *Pectinaria koreni*, elles sont plus importantes à proximité du débouché en mer des

fleuves côtiers du Pays d'Auge, et de manière encore plus prononcée en face de l'exutoire de la Seine. Ce schéma de distribution diffère avec celui de Thiébaud (1994), mais concorde avec celui de Dauvin et Gillet (1991). Ces derniers avaient relié la présence de juvéniles dont la taille du quatrième sétigère (I4) était plus élevée, à des zones où les apports en Matière Organique particulaire étaient les plus élevées. Les résultats peuvent être discutés en fonction de la possibilité d'un recrutement plus précoce pour ces individus juvéniles de plus grande taille. Une étude plus approfondie en utilisant les biomasses par classes de taille devrait permettre de discuter de ces hypothèses. J'ai pu en effet constater, en réalisant les mesures de biométries sur *Owenia fusiformis*, que pour certains groupes d'individus où l'I4 était élevée, une faible largeur du premier sétigère pouvait être mesurée.

Les résultats de cette étude ont montré que l'année 2009 était marquée par un moins grand nombre de jeunes individus que l'année 2008, à relier probablement au succès de recrutement d'*Owenia fusiformis*, *Pectinaria koreni* et *Phaxas pellucidus*. Ce n'est pas le cas d'*Abra alba* dont les abondances sont stables. Nous avons pu remarquer que si le nombre de juvénile était divisé par cinq environ chez *Owenia fusiformis* en 2009, le nombre d'individus de plus de un an a été diminué de moitié environ.

### **c. Evolution à long terme : campagnes PECTOW (1988-2006)**

En Annexe 11 (11/B) figurent les cartes de distribution des valeurs d'abondance au sein de la communauté à *Abra alba* / *Pectinaria koreni*, obtenues à l'issu des campagnes d'échantillonnage du suivi PECTOW. 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. Nous pouvons également confirmer cette structuration spatiale 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. Nous pouvons également remarquer 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.

Nous remarquons 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.

### **3. Conclusions-discussion : point de vue de l'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 105. 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 (i) à l'ouest par un axe entre Ouistreham et Antifer puis (ii) 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. Nous pouvons mettre en relation ce schéma global de structuration de la macrofaune benthique avec le schéma général d'organisation des composantes environnementales de la Figure 100.

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 nous connaissons les mécanismes de compétition pour l'espace et la ressource, 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 (i) d'un environnement hypertrophique et (ii) 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 limitante 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", nous remarquons 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. Nous pouvons simplement distinguer deux fronts au sein du "front côtier" caractérisé par de fortes valeurs de richesse spécifique et abondance : l'un que nous pouvons appeler "front d'abondance" où se répartissent les principaux "noyaux" d'abondance, l'autre que nous pouvons appeler "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'espèce 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 100. 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. Nous pouvons 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.

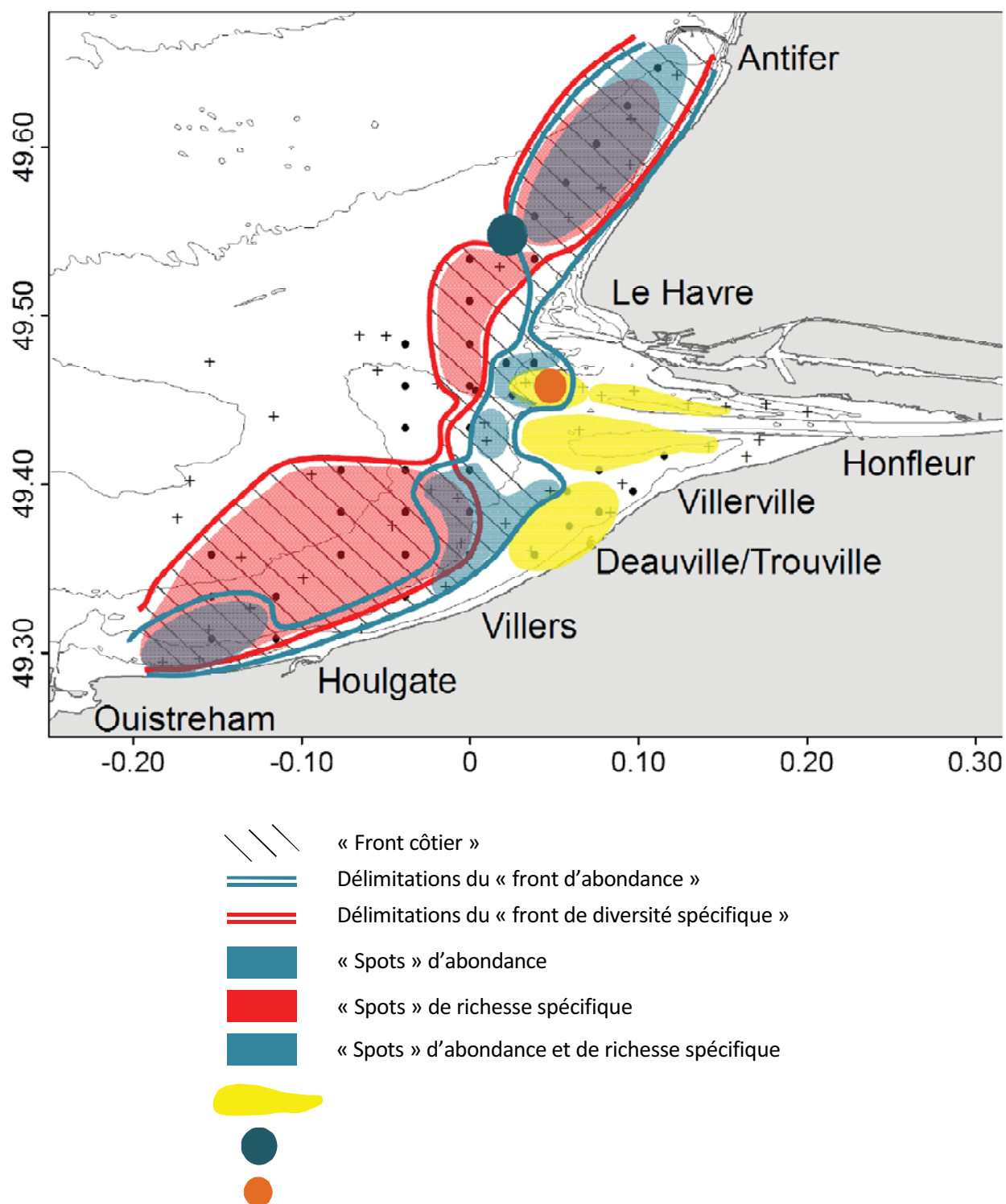


Figure 105 : Carte synthétique et simplifiée de la structuration commune (intégrant les données des années 1988-1991-1996-2001-2006 du suivi PECTOW et des années 2008-2009 des campagnes COLMATAGE) du système "baie de Seine Orientale – embouchure" en termes de spots d'abondance et de richesse spécifique. Se référer au texte pour explications.

## C. ASSEMBLAGES FAUNISTIQUES : CAMPAGNES COLMATAGE 2008-2009

### a. Définitions d'espèces rares

Lorsque que l'on analyse des données faunistiques, il peut être parfois utile, au préalable, d'éliminer de la base de données les espèces rares. La définition d'espèce rare intègre son abondance et sa distribution sur l'aire échantillonnée. Ce choix est souvent guidé par le besoin de réduire le nombre de descripteurs pour simplifier l'interprétation des résultats, et améliorer les résultats d'analyses.

Plusieurs interprétations de la rareté sont possibles, et la qualification de rareté à une espèce donnée est souvent attribuée de manière arbitraire. Parmi les choix les plus couramment adoptés figurent ceux qui reposent sur la terminologie de Colwell et Coddington (1994). Ils définissent ainsi les espèces uniques (échantillonnées en un seul site), les espèces doubles (échantillonnées en seulement deux sites), les espèces singletons (rencontrées en un seul exemplaire) et les espèces doublons (rencontrées en deux exemplaires).

Si l'élimination d'espèces reposant sur cette terminologie peut être qualifiée de "peu contraignante", d'autres stratégies peuvent s'avérer plus sévères. C'est le cas (i) de pratiques consistant à éliminer les espèces qui sont présentes sur moins de 5 % des stations et/ou les espèces qui représentent moins de 5 % des abondances ou encore (ii) de la méthode d'Ibanez et *al.* (1993) basée sur le classement des espèces par ordre croissant selon le nombre de valeurs nulles présentes.

En effet, il est possible que certaines des espèces peu abondantes soient réparties en quelques stations proches spatialement ou que certaines des espèces les moins bien réparties soient localement abondantes. Ces particularités, tout comme l'existence de plusieurs espèces dites rares dans un même relevé, témoignant de groupements faunistiques originaux, peuvent parfois apporter des informations utiles à la compréhension de l'organisation du système. C'est notamment le cas d'*Asthenognathus atlantius*, petit décapode rencontré à raison de deux exemplaires sur la campagne PECTOW 2011. Un intérêt particulier pour cette espèce pourtant rare et vasicole a permis de montrer qu'elle était régulièrement rencontrée depuis 2008, témoignant ainsi de l'envasement, notamment en baie de Seine Nord-orientale (Jourde et *al.*, soumis).

Ainsi, une espèce considérée comme rare peut parfois être le signe d'une modification de l'écosystème, et il faut rester prudent lorsque l'on choisi de retirer du tableau de donnée initial certaines espèces. Le choix doit être justifié par rapport à la question posée en amont de l'analyse, et doit se faire après avoir pris connaissance de la structure des données.

Une méthode développée pour la librairie {pastecs} (logiciel R) par Grosjean et Ibanez (2002), et mise en œuvre par la fonction *abund()*, effectue le tri des espèces et trace deux courbes

selon deux critères : i) le nombre de valeurs nulles par rapport au nombre d'observation total et ii) le nombre total d'individus dénombrés dans l'ensemble des stations rapporté à une échelle 0-1.

Le tri se fait en valeurs croissantes sur le vecteur  $c$  suivant :

$$c = (1 - f) \cdot \frac{N0_i}{N} + f \cdot \frac{\log(NI_i)}{\log(NI_{\max})}$$

" $f$ " est le poids donné, lors du tri, au critère d'abondance en termes de nombre d'individus dénombrés (compris entre 0 et 1). Si " $f$ " est choisi égal à 0, le classement des espèces se fait selon le nombre de 0 présents (méthode d'Ibanez et *al.*, 1993).

Si " $f$ " est choisi égal à 1, le classement des descripteurs se fait selon les valeurs d'abondance. Il est proposé de prendre par défaut  $f$  égal à 0,2 qui permet, d'après l'exemple de Grosjean et Ibanez (2002), de distinguer à gauche, les espèces les mieux réparties et abondantes et à droite, les espèces mal réparties mais localement abondantes. Une courbe des différences cumulées aide à identifier les limites entre les groupes, ainsi que le plateau définissant les espèces très rares.

Les résultats pour les deux années échantillonnées en 2008 et 2009 sont présentés Figure 106. Les noms de quelques espèces sont reportés sur les graphes en caractère "gras" pour les espèces fidèles à un ensemble entre les deux années, et en caractère "normal" pour les espèces dont le classement a changé entre les deux années.

Il ne s'agit pas d'une méthode permettant de définir les espèces rares de façon strictement objective, mais la représentation graphique permet d'illustrer la nature du jeu de données.

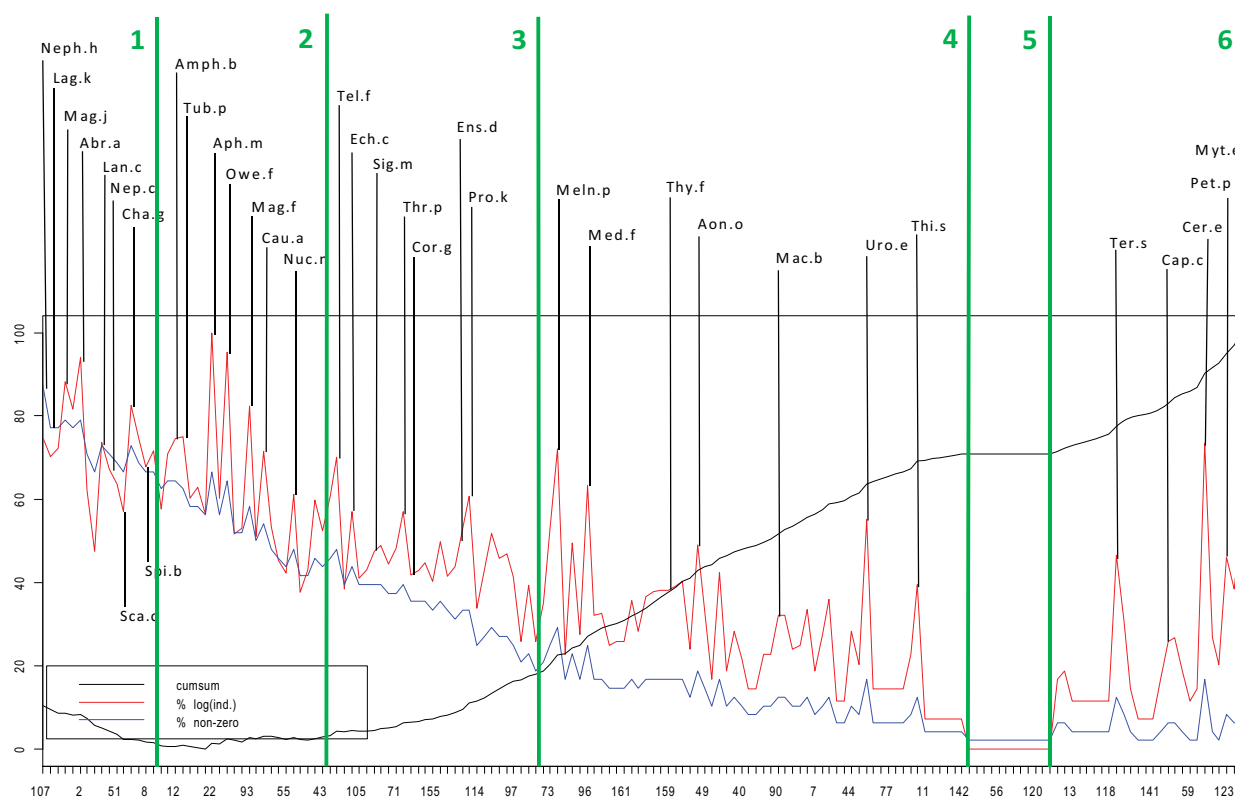
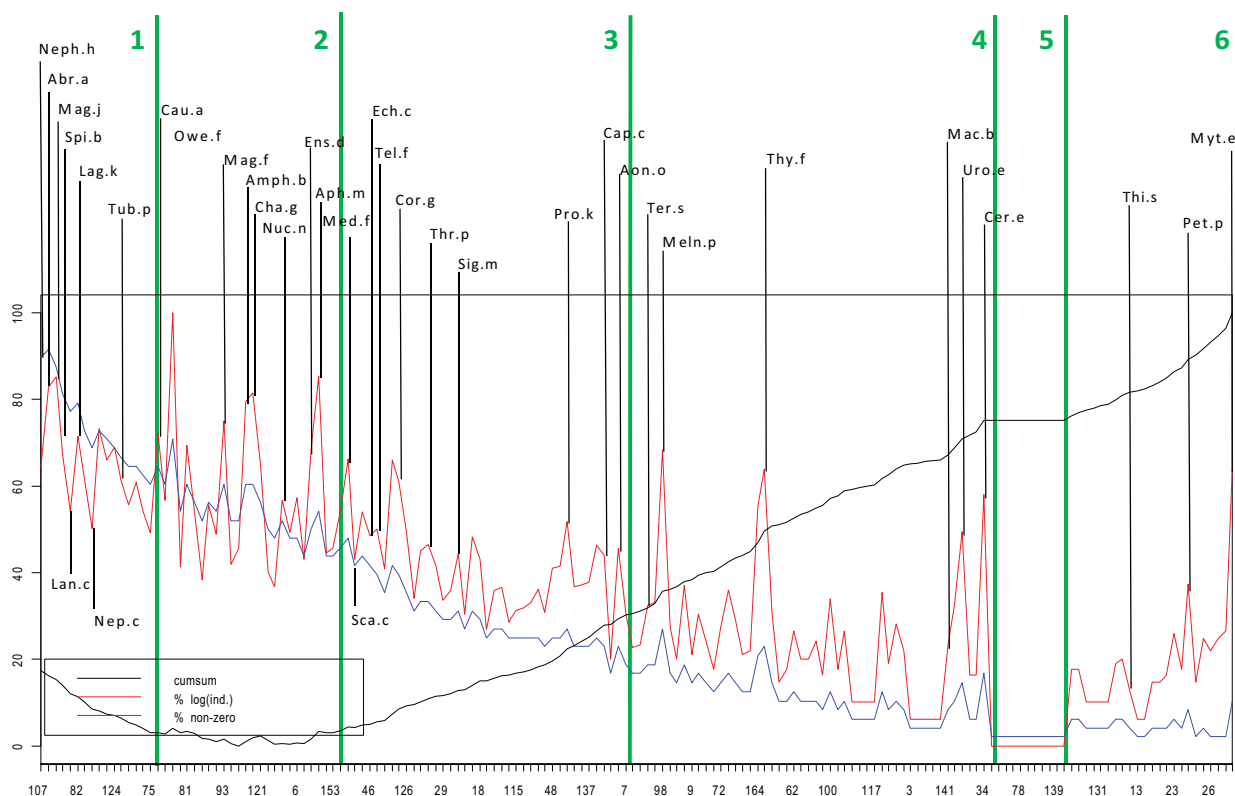



Figure 106: Classement des espèces récoltées aux campagnes COLMATAGE en 2008 (haut) et en 2009 (bas) selon la méthode de tri par abondance développée par Grosjean et Ibanez (2002). Courbe en rouge : pourcentage d'individus, courbe en bleue : pourcentage de valeurs non nulles, courbe noire : courbe des différences cumulées. Les lignes vertes correspondent aux délimitations choisies pour différencier différents ensembles d'espèces.



L'examen de l'allure des courbes obtenues pour l'année 2008 et 2009 permet de classer les espèces rencontrées au sein des communautés étudiées en six grands ensembles :

 Ensemble 1 : Espèces abondantes et très bien réparties ;


*Nephtys hombergii* est la mieux répartie et la plus abondante de ces espèces. En première position sur les graphes obtenus pour les deux années, cette espèce est la plus ubiquiste de toutes. Parmi les autres, nous pouvons citer *Abra alba*, *Magelona johnstoni*, *Spiophanes bombyx* et *Pectinaria koreni* dont les abondances semblent relativement stables et *Lanice conchilega* et *Nephtys cirrosa* dont les abondances semblent varier plus.

 Ensemble 2 : Espèces moyennement abondantes à très abondantes et bien réparties ;

C'est au sein de cet ensemble que nous pouvons rencontrer les espèces les plus abondantes. Il est remarquable que des espèces ayant un tel pouvoir de reproduction soient moins bien réparties que les espèces du groupe précédent. Cela suggère qu'il puisse y avoir au sein du secteur échantillonné des conditions environnementales limitant leur expansion et/ou qu'il existe des facteurs forçant leur distribution à une zone particulière. Parmi les espèces les plus abondantes de cet ensemble figurent chaque année *Owenia fusiformis*, *Aphelochaeta marioni*, *Magelona filiformis*, *Amphiura brachiata* et *Nucula nitidosa*.

 Ensemble 3 : Espèces moyennement abondantes et moins bien réparties ;

Pour les deux années échantillonnées, nous rencontrons au sein de cet ensemble *Echinocardium cordatum*, *Tellina fabula*, *Corbula gibba*, *Thracia papyracea*, *Sigalion mathildae* et *Protodorvillea kefersteini*.

 Ensemble 4 : Espèces mal réparties et faiblement abondantes à très abondantes ;

L'espèce la plus typique de ce groupe est *Macoma balthica*. Puis figure *Melinna palmata* et *Urothoe elegans*, présentant des abondances non négligeables et relativement localisées. De ces deux espèces, *Melinna palmata* est la mieux répartie. *Thyone fusus* fait également partie de cet ensemble, et ses abondances varient plus d'une année sur l'autre.

 Ensemble 5 : Plateau des espèces très rares ;

Seules 12 espèces sont caractérisées comme très rares en 2008 comme en 2009.

 Ensemble 6 : Espèces très mal réparties et peu abondantes à localement abondantes ;

Nous rencontrons dans cet ensemble, et pour chaque année, *Mytilus edulis* et *Petricola pholadiformis*.

Généralement, pour les deux années étudiées, les espèces les mieux réparties sont abondantes mais les espèces les plus abondantes ne sont pas forcément les mieux réparties. Des espèces mal réparties peuvent être caractérisées par des valeurs d'abondance non négligeables. Si l'on

examine la position de quelques espèces caractérisant les pics observés, nous pouvons remarquer, à quelques exceptions près, qu'elles restent classées dans un même ensemble malgré une certaine variabilité, sans doute liée au plus ou moins fort succès de leur recrutement. Ce résultat témoignerait d'une grande stabilité inter-annuelle (2008-2009) du mode de distribution de beaucoup des espèces rencontrées sur l'aire échantillonnée. Cependant, les courbes sont loin d'être superposables, même au sein des grands ensembles définis, rendant compte de la variété des distributions caractérisant les espèces au sein du secteur étudié. En effet, nous ne pouvons pas définir clairement d'ensembles d'espèces dont les relations distribution/abondances soient fortement similaires. Ce constat laisse présager de l'existence d'une grande diversité d'habitats pour la faune et/ou de réponses particulières à chaque espèce aux conditions environnementales.

### ***b. Classification hiérarchique sur les résultats d'une PACP***

Chaque analyse présente sa propre sensibilité aux espèces rares, fréquentes, ubiquistes, ou encore en termes de meilleure dispersion des relevés ou des variables (Bouxin, 2008). J'ai pu m'en apercevoir en utilisant sur mes données plusieurs techniques d'analyse pour faire des regroupements de stations, à partir des matrices faunistiques ou granulométriques (Classifications ascendantes hiérarchiques avec plusieurs métriques, transformations..., Analyses Factorielles des Correspondances, Analyses en Composantes principales). Elles ont offert divers points de vue de la situation.

Les études antérieures qui ont défini des groupes de stations à l'échelle de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* sur la base de leur composition faunistique (suivi PECTOW) ont bien illustré cette sensibilité à la nature des données, notamment aux abondances particulièrement fortes de certaines espèces dominantes. Dans le cas des données de COLMATAGE 2008-2009, l'échantillonnage correspond à la fin de la période de recrutement pour de nombreuses espèces (Thiébaud, 1994). Il en résulte une plus grande variabilité dans les données que dans le cas de celles issues des campagnes PECTOW, réalisées à la fin de l'hiver.

Il est donc choisi ici de ne présenter que l'analyse des données faunistiques de COLMATAGE 2008-2009, basée sur la transformation des données d'abondance en  $\log(x+1)$  et la matrice transformée en tableau de fréquence : la PACP, "ACP centrée par espèce sur les profils espèces" (Chessel, 2006). La PACP correspond à une ACP sur des profils d'espèces qui peut se concevoir comme un intermédiaire entre une ACP et une AFC. Chaque espèce est une distribution de fréquence qui a un centre de gravité considéré comme le centre de sa distribution, on fait donc l'ACP centrée des points moyens. Elle recherche les scores des relevés centrés réduits pour optimiser la marginalité moyenne des espèces. Donnant moins de poids aux espèces abondantes, et laissant la possibilité aux espèces moins abondantes de jouer un rôle dans la

définition des groupes, elle me paraissait mieux appropriée. D'autre part, les groupes de stations étaient plus facilement identifiables à un bas niveau de coupure sur l'arbre hiérarchique dressé à partir du triplet statistique de l'analyse.

Pour éviter une perte d'information potentielle, il est privilégié ici une sélection "légère" des espèces rares, et seules celles caractérisant le plateau sur les courbes de la méthode de "tri par abondance" obtenues précédemment (Figure 106) seront éliminées avant analyse. Cela représente uniquement 12 espèces pour chaque année.

Les assemblages faunistiques ont été obtenus par classification hiérarchique sur le triplet statistique de l'analyse PACP, selon la métrique euclidienne et la méthode d'agrégation de Ward. La description de chaque groupe identifié a été réalisée à l'aide de la fonction *catdes()* de la librairie {FactoMineR}.

#### *i. Regroupements de stations par assemblages faunistiques*

Les classifications hiérarchiques définissant les regroupements de stations ont été réalisées pour chacune des années 2008 et 2009, les résultats sont présentés Figure 107 et Figure 108. Les espèces définissant les groupes sont classées de la plus corrélée vers la moins corrélée positivement. Seules les dix premières sont notées sur la Figure et le nombre d'espèces supplémentaires est noté en bas de chaque liste.


Deux niveaux de coupure des dendrogrammes, correspondant à deux niveaux d'observation différents, ont été choisis chaque année. Il n'est pas question ici de définir avec précision l'ensemble des assemblages et sous-assemblages faunistiques obtenus avec cette méthodologie, mais d'exploiter uniquement les résultats dans leur ensemble afin de discuter des facteurs de structuration potentiels de ces assemblages. Il est à noter que les espèces caractérisant un assemblage commun aux deux années, ne sont pas exactement les mêmes selon que l'assemblage ait été défini en 2008 ou en 2009. Pour nommer les assemblages communs aux deux années, les espèces caractéristiques communes ont été retenues.

En s'intéressant à la distribution des assemblages et sous-assemblages définis chaque année, nous pouvons remarquer une grande stabilité inter-annuelle de leur distribution spatiale. Il est distingué :


 Un "assemblage estuarien" à *Cerastoderma edule* et *Macoma balthica* à l'embouchure.

Nous pouvons assimiler cet assemblage à la communauté des vases estuariennes à *Macoma balthica* définie par Cabioch et ses collaborateurs. Il est situé au sein de la zone de très faibles richesses spécifiques et abondances, identifiée sur la Figure 105, et seulement cinq espèces représentent cet assemblage en 2008 comme en 2009. Il est réparti au sein de sédiments vaseux compactés sur lesquels peuvent transiter des sédiments fins sableux à vaseux, mais également

jusqu'au niveau de la zone de dépôt de dragage du Kannick, correspondant à des fonds essentiellement sableux. En se plaçant à un niveau d'observation plus réduit, on distingue (i) un sous-assemblage toujours représenté par *Cerastoderma edule* et *Macoma balthica*, pour les deux années, et principalement localisé à l'embouchure interne puis (ii) un sous-assemblage représenté en 2008 par *Spio martinensis* et en 2009 par *Nephtys cirrosa*, distribués chaque année sur la zone de dépôt de dragage du Kannick et en quelques stations dans l'embouchure interne.


 Un "assemblage sub-estuarien" à *Ensis directus*, *Tellina fabula*, *Owenia fusiformis*, *Pectinaria koreni*, *Eteone longa* et *Abra alba* en baie de Seine Sud-orientale, jouxtant l' "assemblage estuarien".

Si les espèces de cet assemblage font référence aux espèces caractéristiques de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* définie dans les années 1970, il est spatialement moins étendu et se place au sein de la zone identifiée comme présentant de fortes abondances sans que les richesses spécifiques ne soient importantes (Figure 105). Parmi les espèces caractérisant cet assemblage, *Owenia fusiformis*, *Abra alba* et *Pectinaria koreni* font parti des dix espèces les plus abondantes retrouvées chaque année (Tableau 7). Nous pouvons remarquer l'émergence d'un sous-groupe en 2009 représenté par *Ensis directus* pour les stations les plus côtières. Il est difficile de relier cet assemblage et ce sous-assemblage à un type sédimentaire particulier d'après cartes des Figures 96 et 97, puisque leurs étendues spatiales couvrent divers types sédimentaires.

 Un "assemblage frontal" à *Melinna palmata*, *Aphelochaeta marioni*, *Mediomastus fragilis*, *Corbula gibba*, *Diastylis laevis*, *Notomastus latericeus* et *Acrocnida brachiata* réparti le long des côtes du Pays de Caux et en baie de Seine Sud-orientale, longeant l'"assemblage sub-estuarien".

Il n'y a pas de correspondance claire entre cet assemblage et les communautés décrites dans le passé. En comparant avec la situation décrite dans Gentil et Cabioch (1997), cet assemblage recouvre la communauté des sédiments hétérogènes sous influence péltique à *Pista cristata*, et se prolonge jusqu'à Ouistreham, au sein de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni*. La présence d'*Acrocnida brachiata* fait également penser au faciès à *Acrocnida brachiata* de la communauté à *Abra alba* - *Pectinaria koreni* comme définit Figure 46 (Dauvin et al., 2002). Cependant, ni *Pista cristata* ni *Acrocnida brachiata* ne se présentent comme les plus caractéristiques de cet assemblage, contrairement à *Melinna palmata*, espèce vasicole nouvellement en expansion dans le secteur (Dauvin et al., 2007). Cet assemblage correspond à la zone où à la fois de fortes richesses spécifiques et abondances sont rencontrées. D'un point de vue sédimentaire, il se situe au sein de sédiments caractérisés par des mélanges sablo-vaseux (Figure 96 et 97). En 2008, il se sépare en deux sous-groupes, l'un caractérisé par *Corbula gibba*,

au sud, au sein d'un mélange sablo-vaseux et l'autre par *Melinna palmata*, au nord, au sein d'un mélange sablo-vaseux cohésif et stratifié. Il est possible que l'apparition d'un tel assemblage reflète un bilan positif de l'envasement à long terme des fonds de la baie de Seine Nord et Sud-orientale.

 Un "assemblage du large" à *Megaluropus agilis*, *Antalis vulgaris*, *Echinocardium cordatum*, *Magelona filiformis*, *Periocolodes longimanus*, *Bathyporeia tenuipes* et *Atylus vedlomensis*, situé au large du secteur.

Cet assemblage est situé au niveau des sables moyens à fins du large. Il se sépare en deux sous-assemblages, l'un proche du banc de Seine caractérisé par *Megaloropus agilis*, *Echinocardium cordatum* et *Periocolodes longimanus*, et l'autre proche du Parfond caractérisé par *Antalis vulgaris* et *Atylus vedlomensis*. En comparaison avec les communautés décrites dans Gentil et Cabioch (1997), nous pouvons relier l'assemblage proche du banc de Seine à la communauté des fonds de sables fins à moyens, dunaires et propres à *Ophelia borealis*. Non pas par la présence d'*Ophelia borealis*, espèce qui n'a pas été récoltée dans COLMATAGE, mais par sa localisation sur une formation dunaire sableuse. L'assemblage proche du Parfond peut être vu comme une zone de transition entre les assemblages sur les fonds de mélanges sablo-vaseux et les ensembles aux sédiments plus grossiers du large. Les sables moyens y sont en mélange avec des sables plus grossiers. Il peut être assimilé, de ce point de vue, à la communauté des sédiments hétérogènes sous influence pélagique à *Pista cristata*, même si cette espèce n'est pas ici caractéristique de cet assemblage.

Nous pouvons remarquer que les délimitations entre ces assemblages diffèrent légèrement entre les deux années. En baie de Seine Sud-orientale, on peut y voir (i) l'imbrication possible de l'"assemblage" du large et de l'"assemblage frontal", en deux stations au large de Villers, et (ii) l'imbrication possible de l'"assemblage estuarien" avec l'"assemblage sub-estuarien", en trois stations à l'embouchure externe.

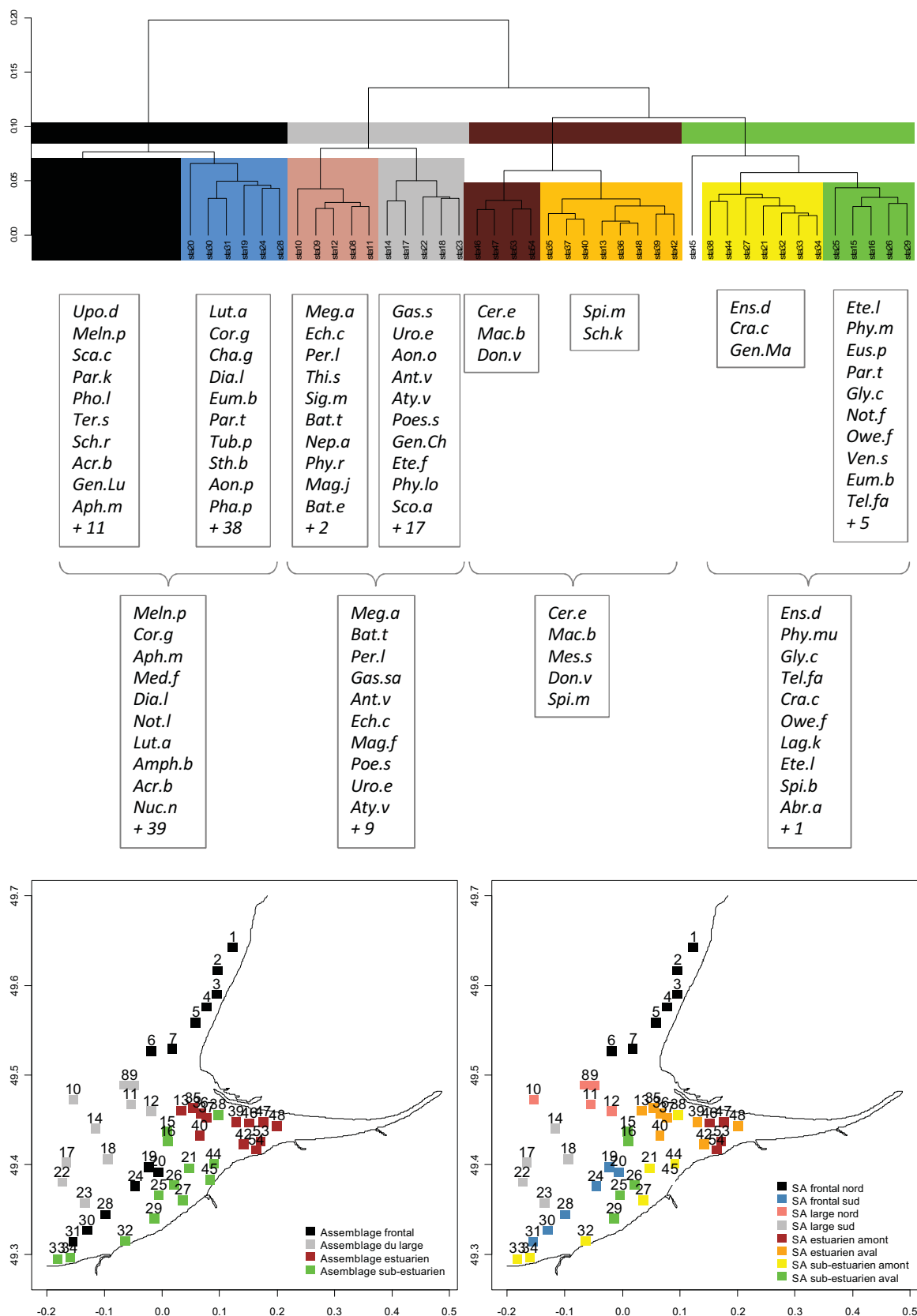


Figure 107: Classification hiérarchique obtenue sur la base du triplet statistique de la PACP (Analyse en composante principale sur tableau de fréquence) sur les données faunistiques transformées en  $\log(x+1)$  de la campagne COLMATAGE 2008 (haut). Cartographie spatiale des assemblages et sous-assemblages identifiés et correspondant au découpage de l'arbre hiérarchique en quatre (bas et gauche) et en six (bas et droite).



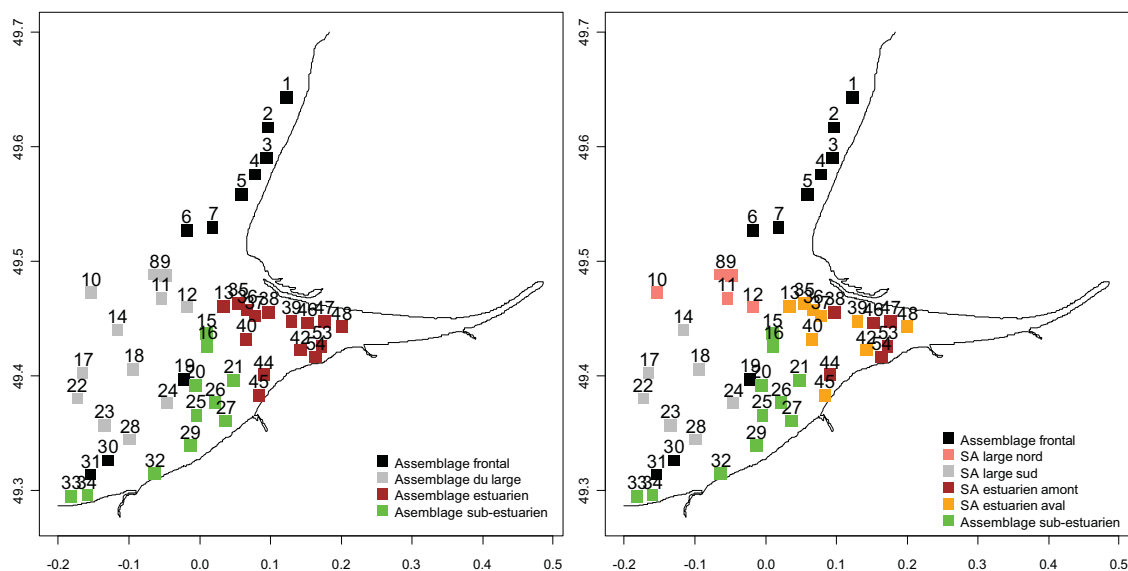
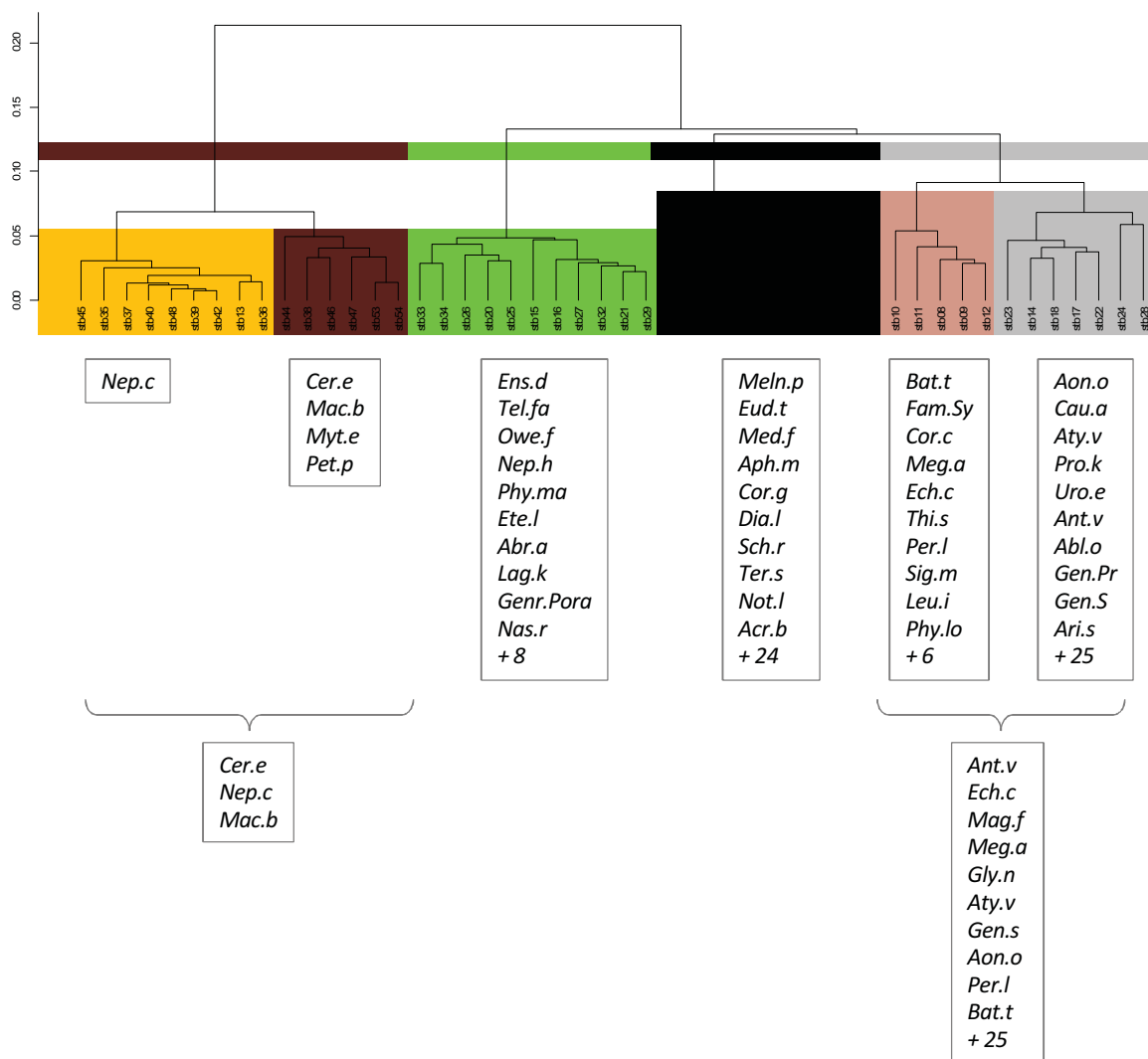


Figure 108: Classification hiérarchique obtenue sur la base du triplet statistique de la PACP (Analyse en composante principale sur tableau de fréquence) sur les données faunistiques par station transformées en  $\log(x+1)$  de la campagne COLMATAGE 2009 (haut). Cartographie spatiale des assemblages et sous-assemblages identifiés et correspondant au découpage de l'arbre hiérarchique en quatre (bas et gauche) et en six (bas et droite).

## ii. Regroupement de prélèvements (réplicats) par assemblages faunistiques

Les assemblages faunistiques ont également été réalisés par classification hiérarchique sur une PACP en tenant compte de chaque répliquats, ils sont représentés Figure 109, superposés les uns sur les autres, pour les deux années 2008 et 2009 des campagnes COLMATAGE.

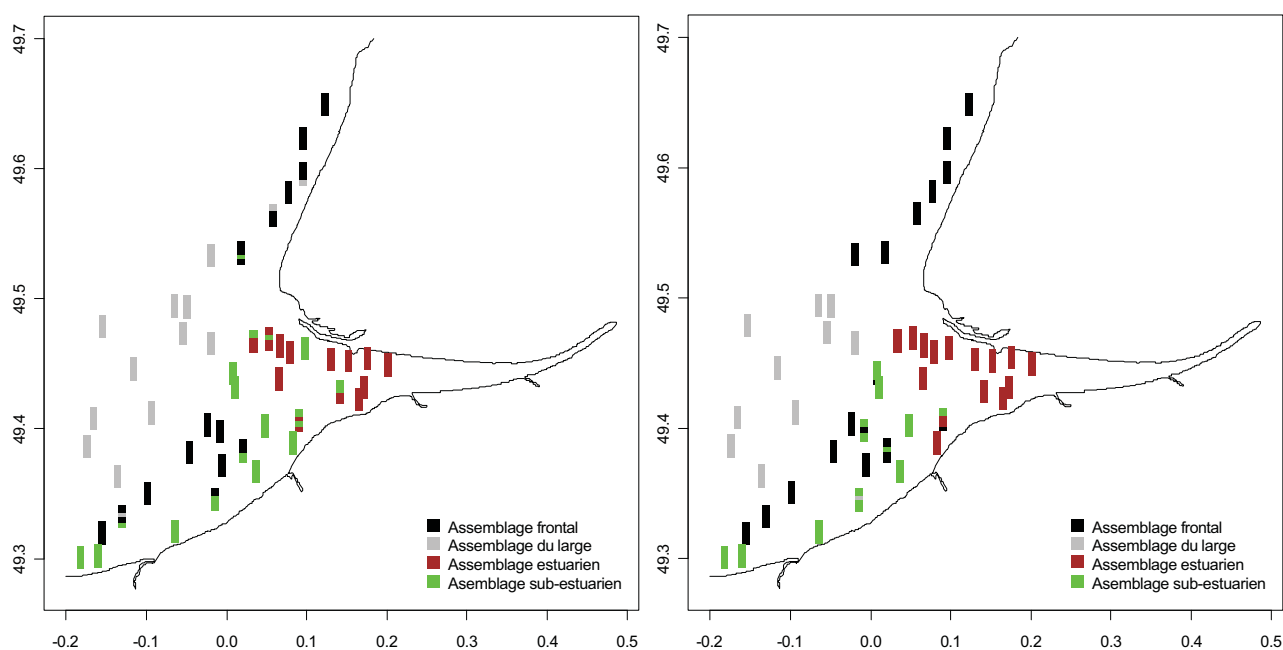


Figure 109 : Cartographie spatiale des assemblages identifiés à partir des classifications hiérarchiques obtenues sur la base du triplet statistique de la PACP (Analyse en composante principale sur tableau de fréquence) sur les données faunistiques par répliquats transformées en  $\log(x+1)$  des campagnes COLMATAGE 2008 (gauche) et 2009 (droite). Les quatre répliquats considérés dans l'analyse sont superposés.

Il n'est pas nécessaire de décrire à nouveau ces assemblages, ils correspondent à ceux définis précédemment sur la base des regroupements de stations. La représentation des quatre répliquats superposés sur la carte, permet simplement de montrer que parfois, les répliquats d'une même station ne font pas parti du même assemblage. Cette représentation est à relier avec la notion d'hétérogénéité entre répliquats que nous avons pu apprécier au travers de l'analyse texturale des sédiments. Le résultat est cohérent, les stations dont les répliquats ne font pas partie du même assemblage sont situées en milieux très côtiers, caractérisés par une hétérogénéité sédimentaire.

## 2. Conclusion-discussion : vers une approche spécifique de l'étude des relations benthos-sédiments

Les assemblages faunistiques réalisés sur les résultats d'analyse de la PACP montrent quelques similitudes avec les communautés décrites par Gentil et Cabioch (1997) sur ce secteur. Nous retrouvons (i) au large les fonds de sables fins à moyens dunaires propres et les fonds de

sédiments hétérogènes sous influence péritique, (ii) dans l'embouchure, les fonds vaseux à *Macoma balthica*.

En position intermédiaire, la communauté des sables fins envasés à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* est moins clairement identifiée même si sa présence est encore ressentie. En effet, *Abra alba* et *Pectinaria koreni* font partie des espèces caractéristiques d'un "assemblage sub-estuarien", et font partie des espèces à la fois les plus abondantes et les mieux réparties au sein du secteur étudié. Il semble néanmoins qu'il y ait eu, depuis, certains changements dans la composition faunistique au sein de la communauté type à *Abra alba* – *Pectinaria koreni*, avec apparition d'espèces vasicoles, *Melinna palmata* et *Corbula gibba*, et caractéristiques d'un assemblage bien représenté en baie de Seine Nord-orientale et dans une moindre mesure en baie de Seine Sud-orientale. Ce constat semble conforter l'hypothèse d'un envasement des fonds de la baie de Seine Orientale, pressenti lors de l'étude de la distribution et de l'organisation du compartiment benthique sédimentaire.

Si nous pouvons percevoir une relation entre les assemblages définis et les types sédimentaires en considérant le découpage en quatre assemblages, ils ne sont néanmoins pas clairement reliés à une fraction granulométrique particulière. Exception faite pour le sous-assemblage du large nord, installé sur des sables moyens à fins propres, les autres ensembles définis sont installés sur des types sédimentaires variés. De plus, la distribution des assemblages est superposable aux différentes zones définies par le chevauchement du "front d'abondance" et du "front de diversité spécifique" (Figure 105). Cela laisse supposer que les différents assemblages ont été formés en fonction des valeurs de richesses spécifiques et abondances rencontrées, témoignant une fois de plus de la sensibilité de ce type d'analyse à ces paramètres. D'ailleurs, les assemblages faunistiques semblent encore influencés par les fortes valeurs d'abondance. En effet, l'"assemblage estuarien" s'isole des autres assemblages en 2009, en raison des faibles abondances, alors qu'en 2008, c'est l'"assemblage frontal" qui s'isole en raison du recrutement massif qu'il y a eu au sein de cette zone. Nous pouvons ainsi comprendre la difficulté rencontrée par Thiébaud (1997) et Barnay (2003) à mettre en corrélation leurs assemblages faunistiques au sein de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* avec la granulométrie des sédiments.

Même si l'analyse a permis (i) à des espèces moins abondantes de s'exprimer dans la définition des différents ensembles présentés ici et (ii) de supposer un envasement des fonds par rapport à une situation décrite il y a une quarantaine d'années, la pertinence de définir des assemblages faunistiques pour rendre compte plus précisément des relations entre la faune et les sédiments peut encore être débattue. Cette approche est limitée par notre manque de connaissance sur les réponses de la faune face aux différents facteurs auxquels elle est soumise.

Il est proposé par la suite, non pas de tenter d'expliquer la diversité des habitats rencontrés en analysant les cortèges faunistiques, mais d'une part (i) d'analyser simultanément les données faunistiques et sédimentaires, pour sélectionner les espèces pouvant potentiellement expliquer le mieux l'organisation et la dynamique sédimentaires, et d'autre part, (ii) de discuter de la distribution spatio-temporelle de ces espèces au sein de leur environnement tel que nous le connaissons.

## **D. L'ANALYSE DES NICHES SEDIMENTAIRES DE LA MACROFAUNE BENTHIQUE**

### **1. Analyse OMI (*Outlying Mean Index*) des relations macrobenthos-sédiments**

L'analyse OMI (Dolédéc et *al.*, 2000) repose sur la notion de niche écologique. C'est une méthode multivariée descriptive qui attribue des poids équivalents aux sites pauvres et riches en espèces ou individus. On ne cherche donc pas ici à expliquer la structure d'un tableau par rapport à un autre mais plutôt à décrire un lien entre ces deux tableaux en les considérant à un même niveau. Elle peut se voir comme une analyse de co-inertie dans le cadre du couplage faune-milieu, qui a l'avantage de décrire les allures à la fois linéaires et uni-modales des courbes de réponse d'une espèce à une variable environnementale (Chessel et Gimaret, 2007).

N'impliquant aucune hypothèse de départ sur les relations, elle aide à une bonne représentation des niches "réalisées". Le tableau de données de milieu est analysé par une méthode au choix traitant de données quantitatives et/ou qualitatives et le tableau faunistique est analysé par une PACP. Le principe général est basé sur la mesure de la marginalité des espèces, distance entre les conditions moyennes de l'habitat qu'elle utilise et les conditions moyennes de l'aire d'échantillonnage utilisée par un taxon théoriquement ubiquiste. Cette technique permet ainsi de décrire pour chaque taxon l'influence des variables environnementales prises en compte dans l'analyse mais également de discuter de leur tolérance ou de leur affinité par rapport au gradient environnemental étudié. Puisque l'analyse est réalisée sur des données granulométriques, il sera question ici de préciser la "niche sédimentaire" des espèces rencontrées sur le site. Plusieurs indices peuvent être calculés : l'indice de marginalité (OMI), équivalent à la position de la niche ; l'indice de tolérance (Tol), indiquant la largeur de la niche ; l'indice de tolérance résiduelle (RTol), indiquant l'efficacité des variables environnementales dans la définition de la niche. Afin de savoir si la marginalité d'une espèce est significative, un test *random* (Test de Monte Carlo) attribue au hasard 1000 fois ses abondances aux prélèvements pour simuler son indifférence. Pour l'interprétation de ce test, une marginalité très significative est attribuée aux espèces ayant des p-values inférieures à 0,01, significative si comprises entre 0,01 et 0,05, et non significative pour les valeurs plus élevées.

Elle permet ici d'étudier et de préciser l'organisation de la macrofaune benthique en baie de Seine Orientale et à l'embouchure avec son environnement sédimentaire, en privilégiant une approche spécifique. Le traitement des données a été mené sous R et l'analyse OMI peut se faire par la fonction *niche ()* du paquet {Ade4}. Les regroupements d'espèces et de stations ont été réalisés avec les fonctions *dist.dudi ()* et *hclust ()* selon la distance euclidienne et la méthode d'agrégation de Ward.

## 2. Choix des variables sédimentaires

Il a été vu au travers de l'étude précédente que la projection des variables sur le plan factoriel rapproche la classe des graviers de celle des sables grossiers. Pour étudier la "niche sédimentaire" des espèces, la classe des graviers n'a pas été prise en compte. Son retrait de l'analyse a pour but de mieux définir les conditions sédimentaires propres à l'épifaune vagile et l'endofaune étudiées. En effet, d'après les données granulométriques, et en visualisant les photographies des sédiments, nous pouvons constater que le volume sédimentaire majoritaire des échantillons présentant cette fraction est souvent caractérisé par un mélange de vases et de sables, ce qui correspond mieux à l'habitat sédimentaire de la macrofaune. Comme précisé dans la première partie de ce chapitre, la classe des graviers n'est pas la plus caractéristique des fonds à l'échelle du secteur étudié. Cependant, nous avons pu constater au travers de l'ACP réalisée sur toutes les classes granulométriques disponibles que les graviers étaient étroitement reliés à la présence de sables grossiers (variables proches sur le plan factoriel). Ainsi, la perte d'information à ne pas prendre en compte cette fraction est mineure, la notion d'hétérogénéité granulométrique est conservée et peut être appréciée par la présence de sables grossiers.

## 3. Choix des espèces

### *i. Données récentes COLMATAGE (2008-2009)*

Une première analyse a été réalisée sur l'ensemble des données groupées des années échantillonnées en 2008 et 2009. Une transformation  $\log(x+1)$  a au préalable été appliquée sur les données d'abondance pour réduire les effets des espèces caractérisées par de forts effectifs. Un test global de la marginalité moyenne de toutes les espèces s'est montré significatif ( $p = 0,001$ ), justifiant ainsi de l'utilisation d'un diagramme d'ordination pour situer les centres d'inertie des niches. Ce premier aperçu, traitant de l'ensemble des données, a montré que presque la moitié (44,5 %) des espèces était caractérisée par une marginalité significative de leur niche, témoignant ainsi de l'influence moyenne des variables environnementales sélectionnées sur la distribution des espèces. Cependant, un premier aperçu des résultats a montré que traiter autant d'espèces dans une même analyse complique à la fois les représentations graphiques et

l'interprétation. Connaissant l'existence, dans le jeu de données, de nombreuses espèces trop fréquentes ou trop peu abondantes pour être informatives dans la quête de connaissance de l'organisation du benthos en relation avec son environnement sédimentaire, il fallait faire une sélection des espèces. L'analyse OMI ne pouvant être significative pour des espèces trop peu fréquentes par exemple, un test de Monte Carlo a été réalisé sur l'ensemble des données, et seules les espèces qui montraient une forte significativité de leur marginalité ont été conservées ( $p < 0,01$ ). Ce sont donc en définitive 43 espèces qui ont été retenues pour cette étude.

#### *ii. Données historiques PECTOW (1988-1991-1996-2001-2006)*

Concernant les données historiques, la même approche a été engagée, ce sont 37 espèces qui ont ainsi été sélectionnées comme pouvant être potentiellement intéressantes à étudier dans le cadre de l'étude des changements à long termes du compartiment benthique et sédimentaire en baie de Seine Orientale.

### **4. Résultats obtenus à partir des données récentes COLMATAGE**

#### *i. Regroupement des stations par l'ACP sur les classes granulométriques*

La classification hiérarchique obtenue sur la base du triplet statistique de l'ACP des données granulométriques intégrant quatre classes granulométriques (sans celle des graviers), définit trois groupes majoritaires qui sont eux-mêmes scindés en trois sous-groupes. Elle est représentée sur la Figure 110 et s'associe à une aide à l'interprétation : les variables significativement corrélées au découpage réalisé. Sur cette Figure est également représentée les distributions spatiales de ces groupes et sous-groupes, correspondants aux deux niveaux de coupure du dendrogramme, pour les deux années échantillonnées. Les sorties graphiques concernant l'ordination spatiale des stations dans le plan factoriel défini par les trois premiers axes de l'analyse sont représentées sur les Figures 111 et 112 pour chaque année échantillonnée. Les 9 sous-groupes de stations y sont projetés sous forme d'ellipses pour aider à identifier l'organisation sédimentaire du système. Elles s'accompagnent de l'ordination des quatre variables granulométriques prises en compte.

Les résultats sont très similaires à ceux obtenus en considérant les cinq classes sédimentaires (incluant celle des graviers) représentés Figure 97 et Figure 98. L'équivalence entre les résultats des deux analyses concerne aussi bien les caractéristiques granulométriques que la distribution spatiale des géo-faciès définis. Leur description détaillée n'est donc pas utile ici car elle serait redondante. Néanmoins, les rares différences observées sont expliquées.



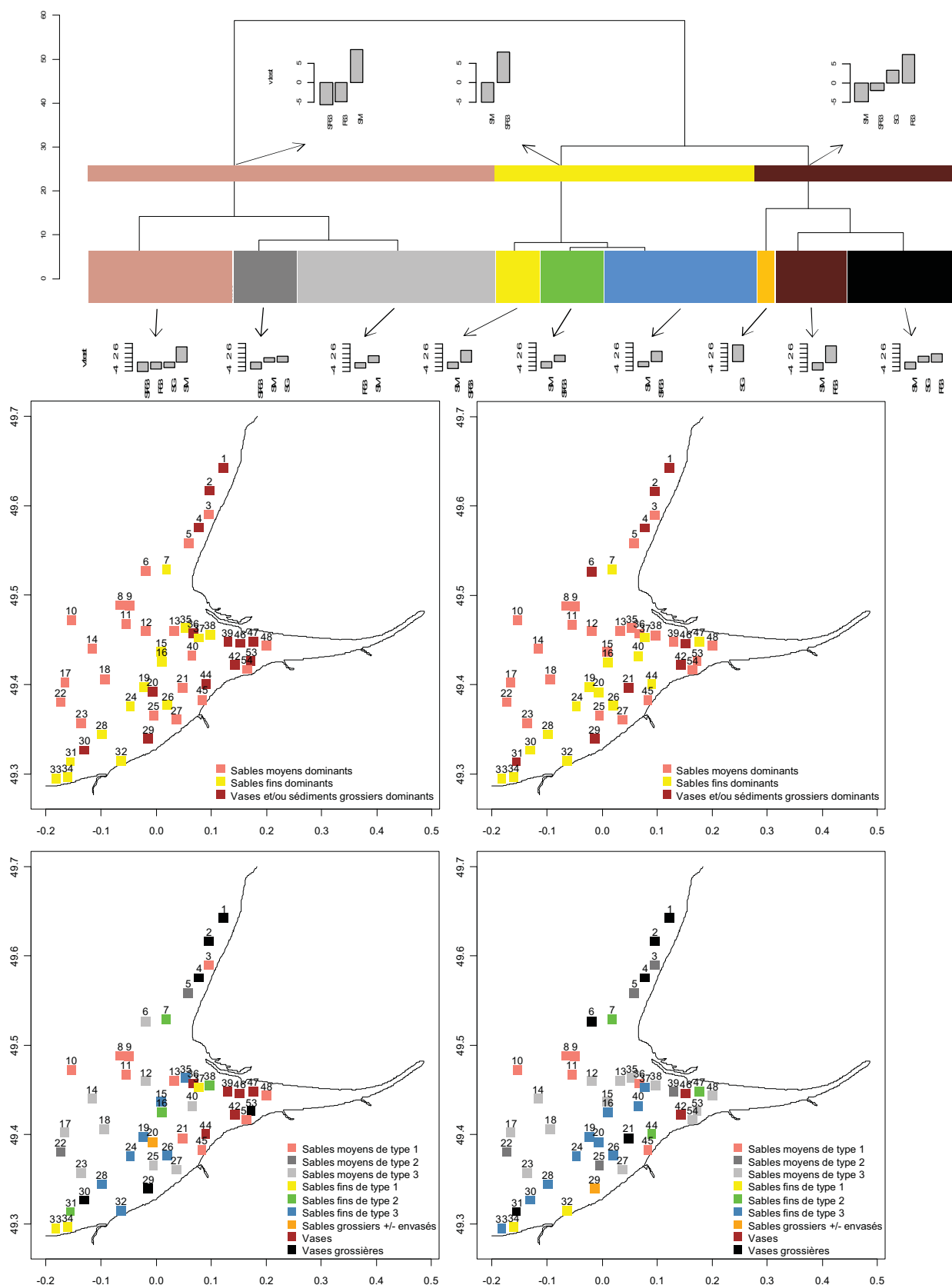


Figure 110 : Classification hiérarchique obtenue sur la base du triplet statistique de l'ACP normée des données granulométriques intégrant quatre classes sédimentaires (F63 : vases < 63  $\mu$ m, SF63 : sables fins (entre 50 et 200  $\mu$ m), SM : sables moyens (entre 200 et 500  $\mu$ m), SG : sables grossiers (entre 500 et 2000  $\mu$ m)) (haut). Cartographie spatiale des géo-faciès identifiés correspondant au découpage de l'arbre hiérarchique en trois groupes pour l'année 2008 (haut et gauche), pour l'année 2009 (haut et droite), au découpage en neuf sous-groupes pour l'année 2008 (bas et gauche) et pour l'année 2009 (bas et droite).


Considérant les trois groupes majeurs, le gradient des sables moyens à fins du large vers les vases plus à la côte, en passant par les stations caractérisées par un mélange des différentes fractions granulométriques, est très bien préservé entre les deux approches. Seule une dénomination de géo-faciès a changé au sein des neuf sous-groupes identifiés, les "Vases grossières" dominées par un mélange de vases et de sédiments grossiers, ont remplacé l'"Hétérogène envasé", qui était caractérisé par la dominance de la classe des graviers. Il faut ainsi entendre par "Vases grossières", des sédiments dominés par les vases et dont la fraction en sables moyens n'est pas négligeable. Les quelques dissemblances concernent quatre stations en 2008 (30, 29, 46, 53) et trois stations en 2009 (31, 21, 6). Les stations 30, 29 et 53 échantillonnées en 2008, et les stations 31, 21 et 6 échantillonnées en 2009, sont toutes passées dans le géo-faciès dénommé "Vases grossières", la station 46 échantillonnée en 2008 est passée du géo-faciès dénommé "Hétérogène envasé" au géo-faciès dénommé "Vases".


## *ii. Résultats de l'analyse OMI après sélection des espèces*

Les Figures 111 et 112 représentent les principaux résultats de l'analyse OMI, réalisée sur les données groupées 2008-2009 des campagnes COLMATAGE. Les ordinations spatiales des espèces, des stations et des variables granulométriques y sont représentées en fonction des axes 1 et 2 puis 1 et 3. Il est à noter que pour une raison de lisibilité, les ordinations de la Figure 112 sont représentées après avoir effectué un "zoom" sur les résultats initiaux. Pour aider à l'interprétation, le tableau qui recense les indices calculés par l'analyse (OMI, Tol et Rtol), est présenté en Annexe 9 (Tableau A). Les résultats sont décrits et discutés en fonction de la distribution spatiale inter-annuelle (2008-2009) de certaines espèces, dont les cartographies sont regroupées en Annexe 10.

Les axes 1, 2 et 3 représentent (respectivement) 60 %, 29 % et 11 % de l'information. Nous pouvons apprécier une certaine concordance entre les assemblages faunistiques proposés, et les différents sous-groupes de stations proposés sur la base des résultats de l'ACP sur les données de granulométrie. Il semble en effet qu'au gradient sédimentaire, identifié à plusieurs reprises au travers des analyses précédentes, il puisse être associé un gradient faunistique. Cela présage, en prenant les résultats dans leur ensemble, d'une influence certaine des paramètres granulométriques sur la distribution faunistique à l'échelle étudiée.

Cependant les assemblages faunistiques et les géo-faciès décrits ne se superposent pas exactement, et seuls deux assemblages faunistiques sont très proches d'un géo-faciès défini par l'ACP sur les données granulométriques. Nous pouvons en effet, en termes de proximité dans les résultats de l'analyse, associer :

 L'assemblage faunistique A représenté par *Petricola pholadiformis*, au géo-faciès "vases", localisé à l'embouchure interne. Espèce significativement très marginale sur le plan factoriel, elle est fortement liée aux vases et possède un faible indice de tolérance résiduelle. Les cartes de distribution spatiale inter-annuelle (2008-2009) de cette espèce montrent la cohérence du résultat d'analyse. Elle est en effet quasi exclusivement localisée à l'embouchure au sein de sédiments en démantèlement. Ce mollusque bivalve est une espèce non native, introduite accidentellement avec l'huître japonaise *Crassostera virginica* en 1890 (Naylor, 1957). Elle vit préférentiellement au sein de substrats compacts dans lesquels elle peut s'installer grâce à son activité mécanique perforatrice (Tebble, 1967). Elle est le témoin de la présence de vases noires compactes anciennes dans les fonds de l'embouchure de la Seine.

 L'assemblage faunistique F représenté par *Thia scutellata* et *Bathyporeia elegans*, au géo-faciès "sables moyens de type 1", correspondant aux sables fins à moyens propres du large, proche du banc de Seine. Les cartes de distribution spatiale inter-annuelle (2008-2009) de *Thia scutellata* confirment sa localisation au sein des sables fins à moyens propres du large. Ce résultat est en accord avec Rees (2001), qui avait observé ces crabes au sein de sables moyens très bien triés avec quelques fragments de coquilles, où les forts courants de marée favorisent la présence de formations sableuses mobiles. Elle n'est pas retrouvée au sein des stations caractérisées par ces sables moyens propres situées plus à la côte, rejoignant les observations de Wolf and Sandee (1971) qui ont récolté ces crabes dans des zones de faible turbidité.


Nous avons ici la définition de deux ensembles "benthosédimentaires" bien distincts, qui correspondent aux extrémités du gradient observable à l'échelle du système "baie de Seine Orientale – embouchure". Les espèces caractéristiques de ces ensembles, citées ci-dessus, possèdent d'ailleurs les indices de tolérance résiduels parmi les plus faibles, il faut y voir une grande efficacité des variables sédimentaire dans la définition de leur niche. Elles sont également les trois espèces les plus marginales de toutes.


En se plaçant entre ces extrémités, nous pouvons encore percevoir un gradient. L'Axe 1 de l'analyse discrimine en effet (i) les sables fins à grossiers plus ou moins envasés dans sa partie négative, associés avec les assemblages faunistiques B, C, D et E, (ii) des sables moyens plus ou moins mélangés aux autres fractions dans sa partie positive, en association avec les assemblages faunistiques G et H. Cependant, la proximité entre les différents assemblages faunistiques et les géo-faciès proposés n'est pas aussi grande que pour les ensembles rencontrés aux extrémités, et de façon encore plus marquée pour les assemblages faunistiques reliés aux mélanges sablo-vaseux.

### ¶ Au sein des sables moyens plus ou moins mélangés aux autres fractions

Les assemblages faunistiques G et H sont proches sur le plan factoriel, et se situent à proximité des "Sables moyens de type 3", près du Parfond. Néanmoins, nous remarquons le décalage (i) de l'assemblage faunistique G, représenté par *Nephtys assimilis*, *Sigalion mathildae*, *Nephtys cirrosa*, *Magelona johnstoni* et *Magelona filiformis*, vers les sables fins, et (ii) de l'assemblage faunistique H, représenté par *Bathyporeia tenuipes*, *Megaluropus agilis*, *Perioculodes longimanus*, *Phyllodoce rosea*, *Poecilochaetus serpens*, *Antalis vulgaris* et *Echinocardium cordatum*, vers le géo-faciès "Sables moyens de type 1", localisé essentiellement au large près du banc de Seine.

Si on compare les cartes de distribution spatiale inter-annuelle de certaines espèces de l'assemblage G (*Sigalion mathildae*, *Nephtys cirrosa*, *Magelona johnstoni* et *Magelona filiformis*), avec celles de certaines espèces du groupe H (*Poecilochaetus serpens*, *Antalis vulgaris* et *Echinocardium cordatum*), nous retrouvons cette tendance. Cependant, leur marginalité reste très significative.

 Les espèces du groupe H semblent plus inféodées aux sables moyens à fins du large, et de manière bien marquée pour *Echinocardium cordatum*. Elles ne sont pas installées au sein des sables moyens situés plus à la côte et très peu au sein des stations en mélange sablo-vaseux de la baie de Seine Sud-orientale. Il est possible que ces espèces supportent mal la dessalure des eaux et qu'elles aient aussi une préférence pour les sables propres. Nous pouvons remarquer, malgré cette tendance commune, que chacune de ces espèces semble avoir son propre schéma de distribution. Il diffère légèrement d'une espèce à l'autre et ceci à raison d'une forte stabilité inter-annuelle. En s'intéressant aux différents indices calculés pour les espèces de ces groupes, nous pouvons remarquer que ce sont les espèces de cet assemblage qui possèdent, après les espèces des assemblages A et F, les valeurs les plus en faveur d'une relation avec les paramètres sédimentaires. Les plus fortes abondances d'*Echinocardium cordatum* sont rencontrées chaque année au sein d'un petit nombre de stations au large, caractérisées principalement par des sables moyens à fins propres. Si ce noyau d'abondance est bien localisé chaque année, la distribution spatiale est sensiblement plus étendue en 2009 à la baie de Seine Sud-orientale. Au regard de la relation étroite de cette espèce avec la nature sédimentaire, cela pourrait être mis en relation avec la couverture sableuse de surface constatée plus épaisse en 2009 lors de l'analyse texturale.


 Les espèces du groupe G montrent une distribution plus au large, et chaque espèce présente également son propre schéma de distribution, dont la stabilité inter-annuelle est remarquable. Alors que *Sigalion mathildae* et *Magelona filiformis* ont une distribution décalée vers les stations du large, *Magelona johnstoni* a une distribution décalée vers la côte, et de façon encore plus marquée pour *Nephtys cirrosa*. Ainsi, il semble que pour ces espèces, les conditions

de salinité puissent jouer un rôle important sur leur répartition. Si le lien entre les espèces de cet assemblage et les sables moyens est constaté au travers de leur position sur les plans factoriels, il est probablement plus faible en raison (i) des conditions de salinité dans le milieu qui ne sont pas prises en compte ici, mais aussi (i) de la présence de ces espèces à des stations caractérisées par des fractions granulométriques plus en mélange. De plus, l'analyse texturale avait montré une hétérogénéité horizontale et/ou verticale marquée en certaines zones, dont les données granulométriques ne pouvaient pas rendre compte. Il est ainsi possible que la niche sédimentaire véritable de ces espèces ait été mal estimée. Leur niche sédimentaire est d'ailleurs moins franche au regard des indices calculés. La question de savoir si ces espèces sont véritablement affines des sables moyens mais tolérantes à des classes sédimentaires variées peu encore se poser.

Alors que dans (Meibner & Darr, 2009), le développement de modèles d'habitats avait montré que *Magelona johnstoni* était associée à des habitats variés et *Magelona filiformis* à des sédiments dont le pourcentage de vase était inférieur à 10 %, les données de COLMATAGE montre que *Magelona johnstoni* a une distribution spatiale qui semble en étroite relation avec la présence de plus de 50 % de sables moyens dans les sédiments alors que *Magelona filiformis* se distribue au sein des sables moyens propres mais aussi au sein des sables fins de type 3 caractérisés par la dominance de sables fins en mélange avec d'autres fractions. Dans les deux cas, elles ne sont pas récoltées là où les pourcentages de vases sont élevés (supérieurs à 25 %).


Parmi les espèces de cet assemblage, nous pouvons remarquer que *Nephtys cirrosa* présente une valeur de tolérance résiduelle faible, témoignant de sa relation étroite avec les sables moyens. La présence constatée d'une couverture sableuse plus importante en surface en 2009 pourrait ainsi expliquer les plus fortes abondances de *Nephtys cirrosa* sur son aire de répartition cette année là par rapport à 2008, où les sables fins et les vases étaient mieux représentés.

#### ∩ Au sein des sables fins à grossiers plus ou moins envasés

 Les assemblages faunistiques D et E sont proches sur le plan factoriel et se situent entre les "Vases grossières" et les "Sables fins de type 3". Néanmoins, nous remarquons le rapprochement de l'assemblage faunistique D, représenté par *Corbula gibba*, *Erichthonius punctatus*, *Melinna palmata*, *Lutraria angustior* et *Mediomastus fragilis*, avec le géo-faciès "Vases grossières", localisé essentiellement en baie de Seine Nord-orientale. Ces deux assemblages, pourtant proches sur le plan factoriel, se distinguent par les indices calculés. Si l'assemblage D présente des valeurs en faveur de l'existence d'une relation avec la nature sédimentaire, et ceci de façon plus marquée pour *Melinna palmata* et *Mediomastus fragilis*, les espèces de l'assemblage E (*Eunereis longissima*, *Nucula nitidosa*, *Abra alba*, *Pectinaria koreni*, *Owenia fusiformis*, *Phyllodoce mucosa*, *Pariambus typicus*, *Ensis directus* et *Liocarcinus sp.*)

présentent des valeurs qui témoignent d'une plus faible relation avec les variables sédimentaires. Cependant, leur grande proximité sur les plans factoriels amène à penser que ces espèces doivent avoir une distribution semblable, pouvant alors témoigner de l'existence de facteurs environnementaux significativement structurants pour ces espèces, autres que de nature granulométrique.


En examinant plus en détail les distributions spatiale inter-annuelle de certaines de ces espèces : *Corbula gibba*, *Melinna palmata*, *Lutraria angustior* et *Mediomastus fragilis* pour l'assemblage D, et *Nucula nitidosa*, *Abra alba*, *Pectinaria koreni* et *Owenia fusiformis* pour le groupe E, nous remarquons qu'elles présentent certaines similitudes. Les "spots" d'abondance de chacune de ces espèces correspondent, dans l'ensemble aux "spots" de vase permanents de la Figure 100 et aux "spots" d'abondance de la Figure 105. Nous pouvons néanmoins remarquer que les espèces de l'assemblage D montrent une répartition de leurs "spots" d'abondance plus localisés. Cela pourrait expliquer leur caractère plus inféodé aux sédiments envasés. Il semblerait alors que les espèces de l'assemblage E soient de caractère plus ubiquiste et l'hydrodynamisme serait le facteur majeur de leur distribution en "spots" d'abondance, et que les espèces de l'assemblage D se distribueraient à la fois en réponse aux contraintes hydrodynamiques et à la nature envasée des sédiments.

 L'assemblage faunistique C représenté par *Ampelisca brevicornis*, *Eumida bahusiensis*, *Ampelisca tenuicornis*, *Lumbrinereis* sp., *Sthenelais boa*, *Ampharete baltica*, *Notomastus latericeus*, *Ensis magnus*, *Processa* sp., *Cauleriella alata* et *Glycinde nordmanni*, n'est quant à lui pas en rapprochement avec un géo-faciès particulier. Il semble néanmoins plus décalé vers les sables fins à grossiers. Les indices calculés pour les espèces de cet assemblage sont relativement mauvais en termes de définition des niches sédimentaires. Ces espèces pourraient alors être vues comme les plus ubiquistes de celles sélectionnées pour l'analyse au sein du système "baie de Seine orientale – embouchure".

En considérant avec attention les cartes de distribution spatiale inter-annuelle de certaines de ces espèces : *Ampharete baltica*, *Notomastus latericeus*, *Cauleriella alata* et *Glycinde nordmanni*, nous pouvons aisément rapprocher *Notomastus latericeus* d'*Ampharete baltica* et *Glycinde nordmanni* de *Cauleriella alata*. Si le point commun entre ces espèces semble être leur affinité pour des sédiments hétérogènes plutôt grossiers, *Notomastus latericeus* et *Ampharete baltica* semblent bien plus tolérantes à la présence de vase dans les sédiments. Elles sont en effet retrouvées au sein de sédiments dont la teneur en vase est comprise entre 10 et 25 %. Ailleurs, dans le secteur Quiberon, *Notomastus latericeus* est vue comme une espèce ubiquiste, et affichant une préférence pour des milieux dont la teneur en vase est comprise entre 10 et 30 %



(Ehrhold, 2010). Toutes ces espèces, malgré leur caractère relativement ubiquiste, ne sont pas récoltées dans l'embouchure, ce qui témoignerait de leur sensibilité à la dessalure des eaux.

 L'assemblage faunistique B, représenté par *Melita palmata*, *Thyone fusus* et *Venerupis senegalensis* n'est pas non plus associé strictement à un géo-faciès particulier, mais nous remarquons sa proximité avec les sables grossiers. Les indices calculés pour les espèces de cet assemblage témoignent d'ailleurs d'une bonne efficacité des variables environnementales dans la caractérisation de leur niche et les indices de marginalités sont forts. Les cartes de distribution spatiale inter-annuelle de *Thyone fusus* confirment ce résultat. Cette espèce est présente au sein de sédiments grossiers, et de manière encore plus évidente pour une station en 2008 où les abondances sont très élevées, sur des sédiments principalement coquilliers.

Ainsi, au sein des sables fins à grossiers plus ou moins envasés et au sein des sables moyens plus ou moins mélangés aux autres fractions granulométriques, de nombreuses espèces semblent avoir leur propre schéma de distribution. Les relations entre certaines de ces espèces et les variables granulométriques ne sont pas nettes. Il est possible, outre l'existence d'autres facteurs potentiellement structurants, que l'hétérogénéité sédimentaire mise en avant au cours de l'analyse texturale puisse empêcher de caractériser clairement les niches granulométriques de ces espèces. Le manque de relation observé concerne en effet principalement les groupes d'espèces dont la position dans l'analyse se rapprochait des géo-faciès caractérisés par une complexité sédimentaire, comme les sédiments en mélange sablo-vaseux. De plus, l'étude de la variabilité inter-annuelle du recrutement présentée plus haut a montré chez trois espèces dominantes, que les stades juvéniles avaient une répartition spatiale plus large que les individus plus vieux.

Alors que les résultats présentés ici sont liés à une situation de post-recrutement, il est possible que la prise en compte de données "faune-sédiment" acquises avant la période de recrutement puisse offrir une description des niches sédimentaires des espèces qui soit différente. Une analyse OMI a donc été réalisée, de la même façon, sur les données du suivi PECTOW afin de rendre compte de la pertinence des observations faites ici. Ces données offrent également l'avantage de prendre en compte un plus grand jeu de données et sur une période d'une vingtaine d'années, intégrant ainsi des situations plus variées.

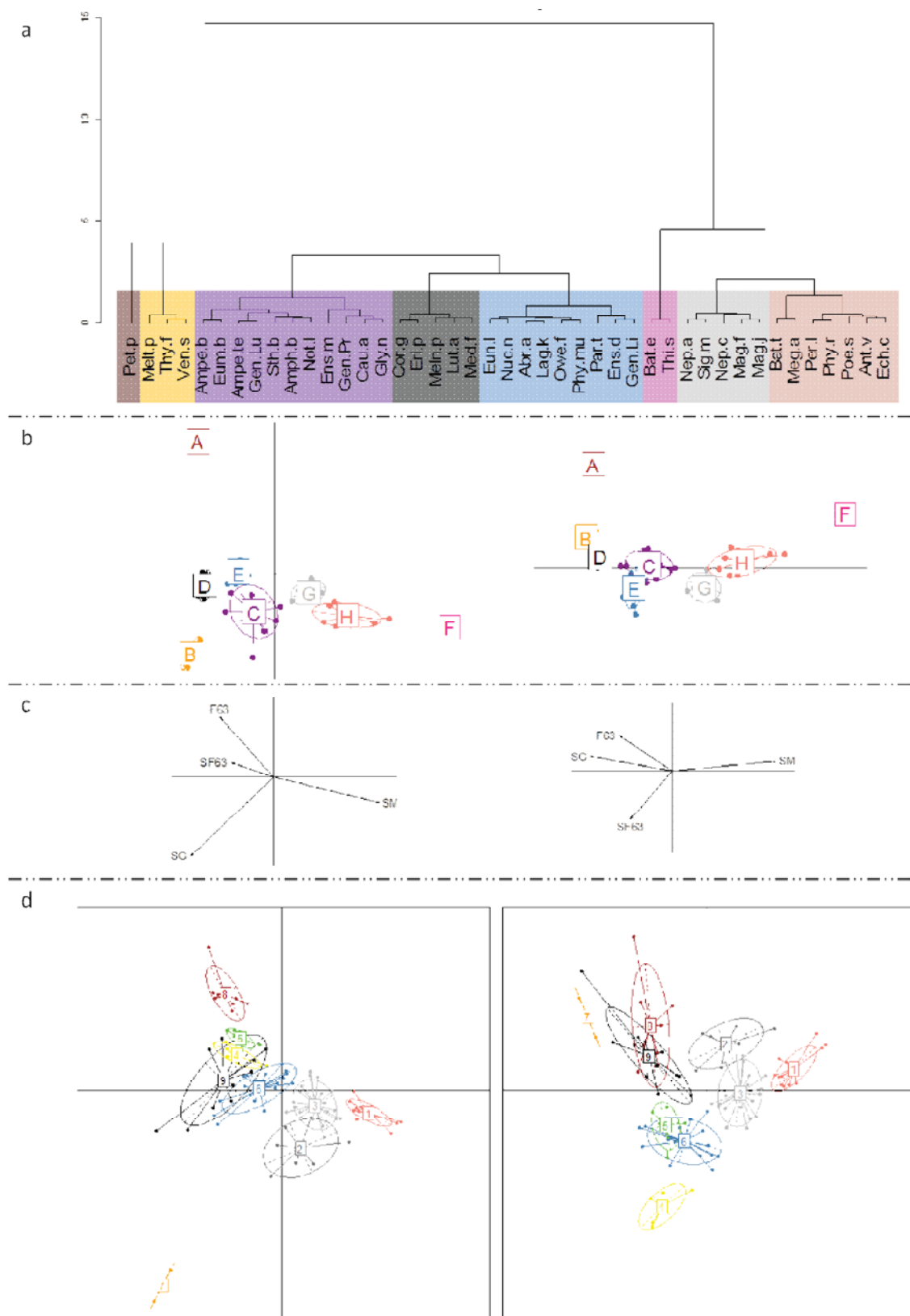


Figure 111 : (a) Classification ascendante hiérarchique sur le triplet statistique de l'analyse OMI réalisée sur les données assemblées 2008-2009 (COLMATAGE) et découpages en huit assemblages faunistiques (de A à H) ; (b) Ordination spatiale et projection des assemblages faunistiques en fonction des Axes 1 et 2 (gauche) puis 1 et 3 (droite) ; (c) Projection des classes granulométriques sur les plans factoriels définis par les Axes 1 et 2 (gauche) puis 1 et 3 (droite) ; (d) Projection sur les plans factoriels définis par les Axes 1 et 2 (gauche) puis 1 et 3 (droite), des géo-faciès définis par classification ascendante hiérarchique sur les résultats de l'ACP sur les classes sédimentaires (sans les graviers).

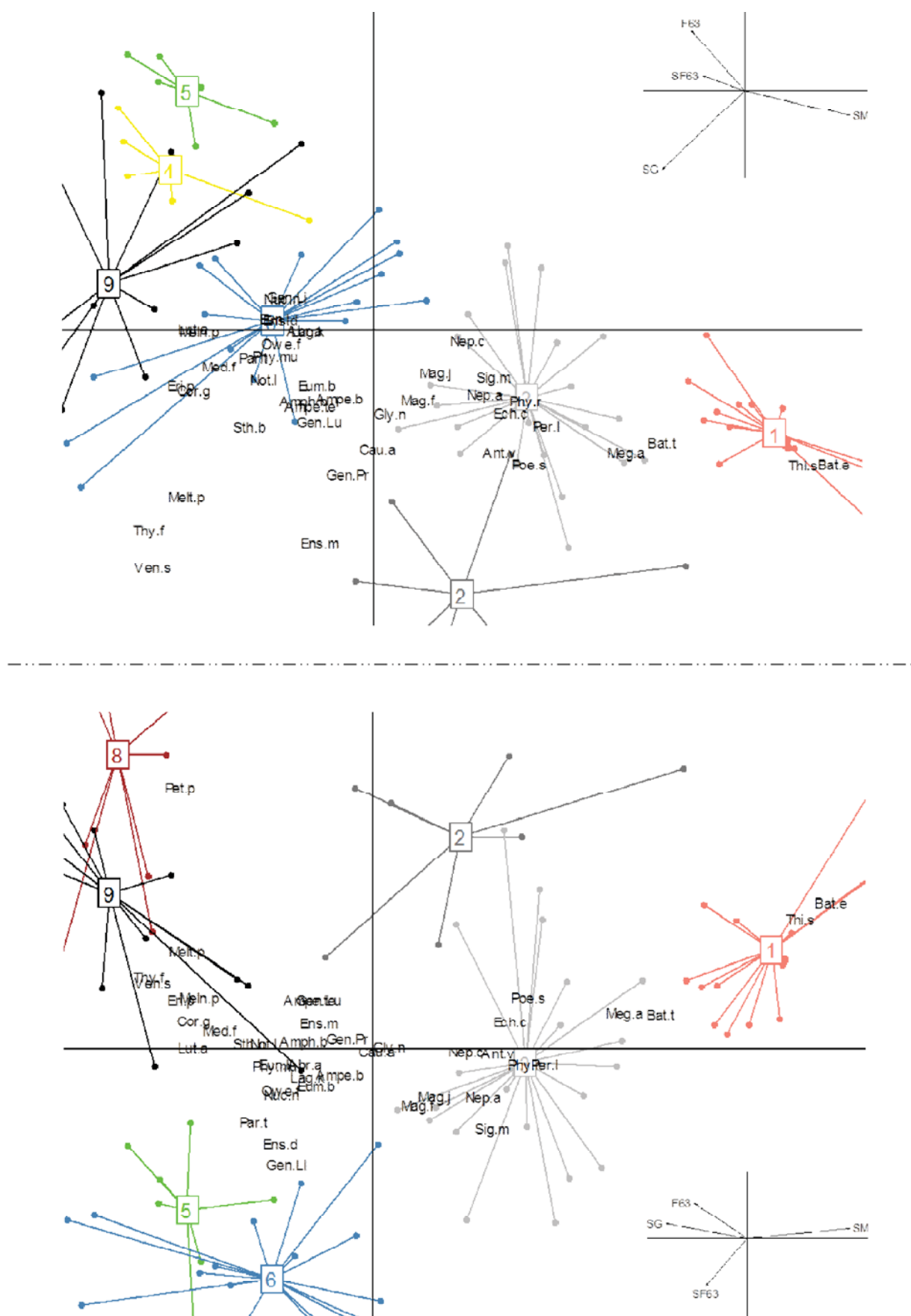


Figure 112 : Projection des espèces sur les plans factoriels définis par les Axes 1 et 2 (haut) puis 1 et 3 (bas) de l'analyse OMI réalisée sur les données assemblées 2008-2009 (COLMATAGE). Projection sur les mêmes plans, des géo-faciès définis par classification ascendante hiérarchique sur les résultats de l'ACP sur les classes sédimentaires (sans les graviers).

## 5. Résultats obtenus à partir des données historiques PECTOW

La Figure 113 représente les résultats de l'analyse OMI, réalisée sur les données groupées des années 1988, 1991, 1996, 2001 et 2006 du suivi PECTOW. Elle montre la classification hiérarchique des espèces, obtenue selon la même approche que précédemment, puis la projection des espèces sur le plan factoriel défini par les Axes 1 et 2 et 1 et 3 de l'analyse. Les Axes 1, 2 et 3 représentent (respectivement) 56 %, 25 % et 19 % de l'information. Pour aider à l'interprétation, le tableau qui recense les indices (OMI, Tol et Rtol) calculés par l'analyse est présenté en Annexe 9 (Tableau B). La couleur d'appartenance d'une espèce à un assemblage donné tel que défini dans l'analyse des données COLMATAGE a été reportée sur le dendrogramme et le plan factoriel de la nouvelle analyse des données PECTOW.

Nous remarquerons que certaines espèces comme *Echinocardium cordatum* et *Petricola pholadiformis* ne font plus partie de la liste des espèces les plus significativement marginales en raison de l'échelle d'observation différente entre les campagnes COLMATAGE et PECTOW. La grille d'échantillonnage de PECTOW ne couvre effectivement pas les zones du large, proches du Banc de Seine et du Parfond, ni les Fosses Nord et Sud à l'embouchure.

Si les résultats issus des deux analyses peuvent ne pas être strictement identiques en raison de la prise en compte d'échelles d'observation spatiale différentes, la période de l'échantillonnage (post ou pré-recrutement), et le nombre différent d'années considérées, peuvent également influencer ces résultats.

Malgré ces différences, les résultats montrent que 20 espèces sont communes aux deux analyses en termes de significativité de leur marginalité par rapport au gradient sédimentaire. En considérant l'agencement de ces espèces communes au sein de l'arbre de la classification hiérarchique dérivé des données PECTOW, nous pouvons remarquer que les espèces qui appartenaient à un même assemblage dans l'analyse des données récentes (2008-2009) sont retrouvées ici relativement proches. De plus, leurs positions au sein des variables granulométriques sont relativement bien préservées, et l'examen des indices calculés pour définir la niche de ces espèces montre les mêmes tendances que pour l'analyse des données récentes. Les différences observées ne sont que mineures, il n'est donc pas nécessaire de les détailler à nouveau.

Les similitudes observées entre les résultats des deux analyses, dans la caractérisation des niches sédimentaires de la majorité des espèces communes, laisse envisager qu'elles puissent être potentiellement intéressantes à prendre en compte dans l'étude de l'organisation et des changements à long terme du compartiment benthique (macrofaune et sédiments).

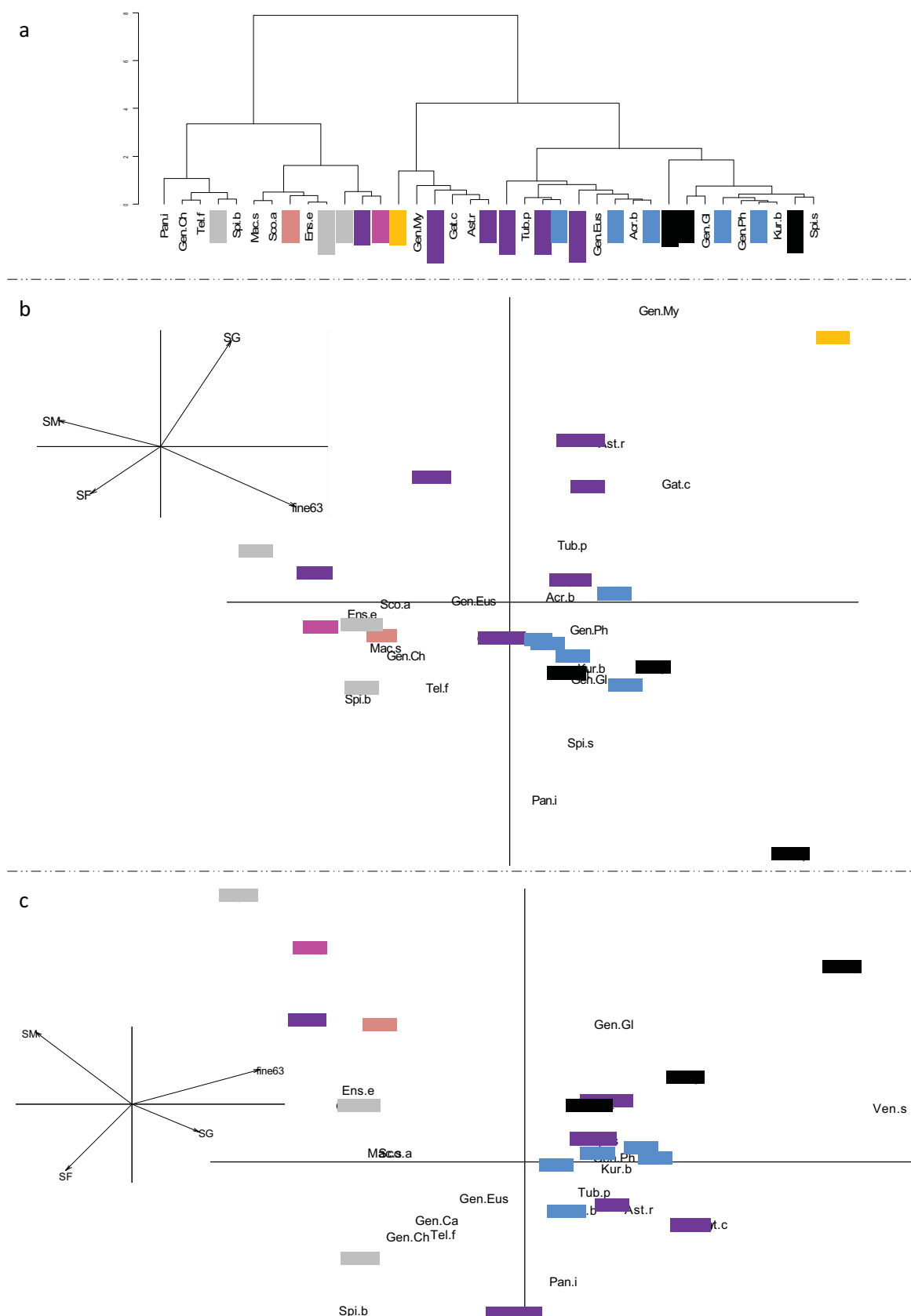


Figure 113 : (a) Classification hiérarchique sur le triplet statistique de l'analyse OMI réalisée sur les données assemblées 1988-1991-1996-2001-2006 (PECTOW), les couleurs correspondent aux différents assemblages définis de la même façon sur les données groupées 2008-2009 (COLMATAGE) ; (b) et (c) Ordination spatiale et projection des espèces sur les plans factoriels définis par les Axes 1 et 2 (a) et 1 et 3 (b) de l'analyse OMI réalisée sur les données PECTOW avec projection des classes granulométriques (sans les graviers) sur les plans factoriels correspondants.

## 6. Conclusion-discussion : relations espèces-sédiments et changements à long terme du compartiment benthique

L'approche spécifique des relations faune – sédiments qui a été entreprise précédemment au travers des analyses OMI, a permis de juger (i) de l'efficacité des variables sédimentaires (granulométriques) à définir la niche sédimentaire d'espèces dont la marginalité par rapport à l'environnement sédimentaire était significative et (ii) de leurs degrés d'affinité et de tolérance aux différentes classes granulométriques. Si les relations entre certaines de ces espèces significativement marginales et les classes granulométriques des sédiments sont clairement établies, pour d'autres, ces paramètres ne semblent pas suffisants pour expliquer leur marginalité significative. Il a donc été évoqué, au travers de l'analyse des données récentes, la possibilité que la nature sédimentaire ne soit pas le seul facteur de leur structuration. L'hydrodynamisme pourrait alors être vu, au sein de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni*, comme un facteur commun de structuration d'une partie de la macrofaune benthique en "spots" d'abondances et des sédiments fins en "spots" de vase permanents.

11 espèces ont été sélectionnées pour discuter de l'organisation du compartiment benthique et des relations benthos-sédiments au sein du système "baie de Seine Orientale – embouchure". Elles font parti des 20 espèces significativement marginales et communes aux analyses OMI, réalisées sur les données des campagnes COLMATAGE et sur les données des campagnes PECTOW.

Sept d'entre elles (*Magelona* spp., *Melinna palmata*, *Nephtys cirrosa*, *Nucula nitidosa*, *Owenia fusiformis* et *Sigalion mathildae*) ont été choisies, au sens de ces analyses, en raison de la marginalité très significative de leur niche sédimentaire. Si *Pectinaria koreni* et *Abra alba* présentent une marginalité moins significative suite à l'analyse des données historiques, elles ont été retenues puisque caractéristiques et abondantes au sein de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni*. *Acrocnida brachiata* n'avait pas été sélectionnée lors de l'analyse sur les données récentes mais sa marginalité était significative après analyse des données historiques, elle a donc été prise en compte. Quant à *Lanice conchilega*, elle a été choisie car à la fois ubiquiste et abondante, comme montré par l'examen des données récentes. De plus, ce tubicole peut se rencontrer en taches de très fortes densités et est décrit comme étant une "espèce ingénieuse" qui peut avoir un rôle structurant, pour les sédiments comme pour la faune (Rabaut et al., 2007).


C'est sur la base de l'analyse de l'évolution de la distribution spatiale des abondances de ces espèces que la question des changements à long terme du compartiment benthique du système "baie de Seine Orientale –embouchure" peut être de nouveau abordé ici. Les cartographies de la



distribution spatio-temporelle des abondances de ces espèces, établies à partir des données PECTOW, sont regroupées en Annexe 11 (11/C).

Tout d'abord, en considérant les résultats des analyses OMI réalisées sur les données historiques et récentes, nous pouvons remarquer la grande proximité en termes de définition de niche sédimentaire entre quelques espèces. Les deux analyses permettent de différencier les espèces aux niches sédimentaires sableuses des espèces aux niches sédimentaires moins marquées, définies dans l'ensemble par des sables envasés.


¶ Parmi les espèces dont la niche sédimentaire appartient aux sables envasés...

 ... Nous pouvons considérer *Melinna palmata* et *Corbula gibba* comme les espèces les plus affines des vases, au sens des analyses, et de manière plus prononcée pour *Melinna palmata*.

Alors que l'annélide polychète *Melinna palmata*, vit au sein de sédiments vaso-sableux dans les eaux tempérées des côtes Bretonnes (Glémarec, 1964 ; Retière, 1979), qu'il vit dans un tube vaseux (Fauchald and Jumars, 1979) et que Guillou et Hily (1983) ont étudié sa recolonisation suite à des dragages à proximité du port de Brest sur des sédiments dont les teneurs en vases varient entre 35 et 45 %, cela confirme sa forte affinité pour les sédiments envasés. Quant au mollusque bivalve *Corbula gibba*, sa niche semble également bien été identifiée puisque Pruvot et al. (2000) signalent sa présence dans le Port de Dunkerque en fortes densités, et qu'il est retrouvé au sein des sédiments du port du Havre (Breton et al., 2005). Ces derniers proposent d'ailleurs de considérer la biocénose des sédiments fins envasés à vases organiques des milieux portuaires confinés, comme un faciès à *Corbula gibba* de la communauté à *Abra alba*.

Les cartes de distribution spatiale de ces espèces montrent que cette affinité pour les sédiments envasés s'exprime différemment selon que l'on considère l'une ou l'autre d'entre elles. *Melinna palmata*, en considérant les données historiques, ne fait son apparition qu'en 2006 et une station proche de la zone de dépôt de dragage d'Octeville est caractérisée par un nombre important d'individus (entre 75 et 100 ind. / m<sup>2</sup>). Cependant, Dauvin et al. (2007) témoignent de son apparition en 2002 au niveau du "spot" de vase permanent face à la Fosse Nord, puis de son extension et de sa prolifération (jusqu'à 277 ind. / m<sup>2</sup>) le long des côtes du Pays d'Auge entre le Havre et Antifer. En 2006, son extension vers la baie de Seine Sud-orientale se profile, à raison d'abondances plus faibles (inférieures à 25 ind. / m<sup>2</sup>). L'examen de la situation en 2008 et 2009 confirme son installation, à raison de fortes abondances (entre 250 et 1000 ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) sur les stations proche de la zone de dépôt de dragage et de la digue du terminal d'Antifer. Ce schéma de distribution témoigne ici du caractère fortement envasé de la baie de Seine Nord-orientale et confirme l'envasement de ces fonds qui était pressenti lors de l'analyse des cartes de distribution des fines. Quant à *Corbula gibba*, elle se distribue le long d'une bande littorale entre Ouistreham


et Antifer, au sein du "Front côtier" de la Figure 105, à l'est de la limite de la zone de dépôts de vases identifiée Figure 100. Dans l'ensemble, ses abondances augmentent au cours du temps et deux "spots" d'abondance semblent s'amorcer près d'Ouistreham et en face de la Fosse Nord. Toujours bien présente en 2008 et en 2009, cette espèce témoigne de l'envasement des fonds de la baie de Seine Orientale.

 ... *Nucula nitidosa* et *Abra alba*, mollusques bivalves, sont vues par les analyses OMI, comme des espèces habitant les sables fins envasés avec une affinité plus forte pour les vases concernant *Nucula nitidosa*.

Sur la majeure partie de la baie de Vilaine, *Nucula nitidosa* est accompagnatrice au sein d'une communauté installée sur des vases pures (Ehrhold et *al.* (2008) alors que dans la partie sud de la baie, elle est dominante au sein d'une communauté caractéristique de vases plus fluides en surface. D'après Degraer et *al.* (2006), *Abra alba* quant à elle, peut être rencontrée au sein de types sédimentaires variés, mais elle semble préférer les sables fins avec des teneurs en vase inférieures à 10 %. Ces informations sont cohérentes avec les résultats de l'analyse OMI.

D'après les cartes de distribution spatiale des abondances de ces espèces, nous pouvons remarquer que les plus fortes abondances sont rencontrées au niveau des "spots" d'abondance de la Figure 105 et des "spots" de vase permanents de la Figure 100. Cependant, il existe une nuance entre les schémas de distribution de ces deux espèces. Les "spots" d'abondance de *Nucula nitidosa* sont strictement localisés au sein des sédiments dont les teneurs en vase sont les plus importantes (près d'Antifer, en Face de la Fosse Nord et près d'Ouistreham), alors que les "spots" d'abondance d'*Abra alba* peuvent être plus étendus, notamment en baie de Seine Nord-orientale le long du Pays de Caux et au nord-ouest de Deauville, en baie de Seine Sud-orientale. C'est le cas notamment en 1991 et en 2001, années pour lesquelles les abondances de cette espèce semblent exceptionnellement élevées. L'observation de fortes valeurs d'abondances observées à 10 années d'intervalle confirmerait l'existence d'un cycle décennal dans l'évolution temporelle des abondances d'*Abra alba*, alors déjà identifié à partir d'une série de données de 1977 à 1991 en baie de Seine Orientale (Dauvin et *al.*, 1993).

Aucune tendance temporelle ne peut être observée chez *Abra alba* alors qu'une augmentation des abondances de *Nucula nitidosa* est visible au cours du temps. Si les niches sédimentaires de ces espèces sont très proches, il est possible que *Nucula nitidosa*, au regard de sa préférence pour les sédiments envasés, puisse également témoigner d'un envasement en baie de Seine orientale.

 ... *Owenia fusiformis* et *Pectinaria koreni*, deux annélides polychètes, se montrent comme des espèces dont la niche sédimentaire est définie principalement par des sables envasés.

Cependant, leur position rapprochée du centre de l'ordination, et les indices caractérisant leur niche, laissent présager d'une tolérance certaine à d'autres fractions sédimentaires. L'analyse OMI réalisée à partir des données historiques permet de rapprocher *Acrocnida brachiata* de ces deux espèces.

D'après Degraer et al. (2006), si *Pectinaria koreni* semble avoir une préférence pour les sédiments fins, cette espèce est également rencontrée sur des sédiments grossiers et elle semble tolérer une large gamme de teneurs en fines dans les sédiments. Elle n'est néanmoins pas récoltée dans des sédiments purement vaseux ou encore dans des sédiments où la fraction fine manque. D'après ces mêmes auteurs, *Owenia fusiformis* peut être rencontré au sein des sables fins jusqu'aux sables moyens, avec néanmoins une préférence pour les sables fins. Les plus fortes occurrences sont atteintes pour des teneurs en vases comprises entre 10 % et 40 %, mais cette espèce est absente des sédiments dont les teneurs en vase dépassent les 40 %. Quant à l'ophiure *Acrocnida brachiata*, elle peut être retrouvée abondante au sein des sables envasés non cohésifs circalittoraux (Connor et al., 2004). Cette espèce qui vit enfouie à 10-20 cm dans les sédiments, et est également retrouvée dominante au sein des sables fins envasés de la baie de Douarnenez (Hily et Glémarec, 1999). Ces constats montrent encore une fois la cohérence des résultats de l'analyse.

En observant dans l'ensemble les schémas de distribution spatiale de ces espèces, toutes se répartissent largement au sein du secteur étudié, avec la présence de "spots" d'abondances encore une fois localisés au sein du "front d'abondance" de la Figure 105, et à l'est de la limite de dépôts de vase de la Figure 100. Néanmoins, tous les "spots" de vase permanents ne sont pas occupés systématiquement chaque année, et chacune de ces espèces possède son propre schéma d'organisation. *Pectinaria koreni* est l'espèce qui montre les plus fortes variations inter-annuelles dans la localisation de ses spots d'abondance, mais l'étude de son évolution au cours du temps ne montre pas de changements particuliers. *Acrocnida brachiata* a une distribution spatiale très similaire d'une année sur l'autre avec ses plus fortes valeurs d'abondance rencontrées le long des côtes du Pays de Caux. Nous pouvons néanmoins remarquer la diminution de ses abondances en baie de Seine Sud-orientale, au large de Houlgate. Quant à *Owenia fusiformis*, ses noyaux d'abondance sont distribués chaque année au sein des "spots" de vase temporaires, et des "spots" d'abondance des Figures 100 et 105. Si cela est bien marqué chaque année à l'embouchure et en baie de Seine Sud-orientale, ce n'est pas le cas entre Le Havre et Antifer. Les valeurs d'abondance de ce tubicole tendent à diminuer au cours du temps. L'examen de la distribution spatiale de cette espèce en 2008 et en 2009 confirme ce changement en baie de Seine Nord-orientale. L'étude de la variabilité inter-annuelle de la distribution spatiale des abondances d'individus de plus de 1 an et d'individus nouvellement recrutés en 2008 et 2009, à d'ailleurs mis


en avant l'absence de recrutement dans cette zone. Alors qu'un envasement exacerbé par les rejets de dragage était pressenti lors de l'examen des changements sédimentaires, il est possible que les fortes teneurs en vase dans ces sédiments, à caractère aujourd'hui cohésif, puissent atteindre un seuil limitant son bon recrutement. *Owenia fusiformis*, tubicole au tube formé par des grains de sables et caractéristique de sédiments sableux et sablo-vaseux (Gentil et Dauvin, 1989), aurait alors besoin d'une quantité de sable en proportion suffisante dans les sédiments pour pouvoir s'y installer et s'y développer. D'après l'examen des photographies des sédiments des campagnes COLMATAGE, les stations entre le Havre et Antifer se distinguaient d'ailleurs par une très fine couche sédimentaire sableuse en surface alors que cette dernière apparaissait plus épaisse en baie de Seine Sud-orientale, où les recrutements ont été meilleurs. Aussi, d'après Rouse & Pleijel (2001), *Owenia fusiformis* est une espèce peu tolérante à une teneur élevée en vase dans les sédiments, qui aurait effet de gêner la construction des tubes des jeunes recrues et entraînerait une mortalité importante. Elle serait alors le témoin d'un changement à long terme de la nature sédimentaire à l'échelle de la baie de Seine Nord-orientale, en raison d'un envasement des fonds prononcé et accéléré par les rejets de dragage. C'est d'ailleurs en cette zone que *Melinna palmata* prolifère.

Si on observe la distribution spatiale des abondances d'*Owenia fusiformis* en 2008 et 2008, elle est distribuée sur l'ensemble de la baie de Seine Orientale avec de plus fortes valeurs d'abondances en baie de Seine Sud-orientale. Si les abondances ont fortement chuté en 2009, son aire de distribution préférentielle reste bien conservée entre les deux années. Nous avons pu remarquer au cours de l'examen des photographies des sédiments que, dans ce secteur, les stations présentant un faciès textural de type mélange sablo-vaseux étaient caractérisées par la présence en grand nombre du tubicole *Owenia fusiformis*, formant des blocs agglomérés. Si l'on compare les cartes de géo-faciès définissant la texture sédimentaire (Figure 96), et les cartes de distribution d'*Owenia fusiformis*, nous pouvons apprécier cette relation.

Le substrat des "spots" d'abondance de cette espèce est caractérisé par un mélange sablo vaseux cohésif et stratifié, ou encore par un mélange sablo-vaseux non cohésif et stratifié. Alors que ces "noyaux" d'abondance sont distribués chaque année au sein des "spots" de vase temporaires et des "spots" d'abondance des Figures 100 et 105, et que cela laisse présager d'un forçage commun de distribution de cette espèce et des particules fines par l'hydrodynamisme, la cohésion et/ou la stratification des mélanges-sablo vaseux sur lesquelles elle est installée, laisse également envisager le rôle structurant de cette espèce pour les sédiments. Alors que Thiébaud (1994) avait évoqué la capacité de ces tubicoles à piéger les particules fines, ils pourraient jouer le rôle de stabiliser les sédiments en favorisant, sur leur aire de distribution, le maintien des particules fines déposées. Il est fort possible que leur présence en fortes abondances puisse

favoriser sur une certaine profondeur (ici on parle des 10 à 15 premiers cm échantillonnée à la benne Van Veen), un mélange par incorporation dans son substrat de vie des fractions sableuses et vaseuses, favorisant ainsi la compaction sédimentaire. Les sédiments fins de sables et de vases formeraient ainsi avec le temps une structure en mélange homogène et plus difficilement remis en suspension par les agents hydrodynamiques, pourtant importants à ces faibles profondeurs. Ainsi, s'il est admis que les sédiments puissent avoir un rôle structurant pour la faune, l'inverse est possible.

¶ Parmi les espèces dont la niche sédimentaire appartient aux sables...

 ... *Nephtys cirrosa*, annélide polychète, affiche clairement une niche composée de sables moyens propres, les annélides polychètes *Sigalion mathildae* et *Magelona spp.* sont plus assimilés à des sables moyens et fins. Une nuance peut être perçue entre *Sigalion mathildae*, dont la niche est décalée vers les sables fins et *Magelona spp.*, dont la niche est décalée vers les sables moyens.

C'est à l'entrée de la baie de Quiberon, en prolongement d'un banc sableux et au sein d'une communauté de sable fin à moyen que *Nephtys cirrosa* est rencontré (Ehrhold et al., 2008). Il est également vu, dans cette étude, comme préférant les sables fins propres. *Sigalion mathildae* est quant à lui plus fréquent sur des sables fins à très fins avec peu ou pas de vase (Holtmann et al., 1996), et d'après Desroy et al. (2002), il est inféodé aux sablons. Les espèces du genre *Magelona spp.* ont été regroupées pour les bases de données historiques, en raison des difficultés relatives à leur identification. *Magenona johnstoni* est une espèce adaptée à la vie au sein de sables mobiles. Jourde (2009) a d'ailleurs identifié une communauté des sables mobiles à *Nephtys cirrosa* et *Magelona johnstoni*, présente en aval de la Fosse Nord.

La comparaison des cartes de distribution spatiale des abondances de *Sigalion mathildae*, avec celles des teneurs en sable fin dans les sédiments, montre très bien son affinité pour les sables fins. Elle est surtout distribuée en baie de Seine Orientale et constitue un bon témoin de la présence de cette fraction sédimentaire. Nous pouvons remarquer qu'elle disparaît de la zone en face de Deauville depuis 2006, alors qu'un changement sédimentaire des sables fins aux sables moyens y est constaté. L'examen des cartes de distribution des abondances de *Magelona spp.* montre, en comparaison à celles des teneurs en sable moyen, qu'ils colonisent les fonds en face et au large de Deauville, en réponse à une augmentation de la teneur en sable moyen dans les sédiments. Si cette tendance peut être perçue, dans une moindre mesure, pour *Nephtys cirrosa*, ce n'est plus le cas en 2006. Il est possible, au regard de son affinité pour les sables propres, que les plus forts pourcentages de vase aient gêné cette espèce.

En s'intéressant aux situations de 2008 et 2009 pour lesquelles les espèces *Magelona filiformis* et *Magelona johnstoni* ont été identifiées, il apparaît que leurs patrons de distribution diffèrent. Si ces deux espèces semblent avoir une préférence pour les sables moyens, il est possible que *Magelona filiformis*, de plus petite taille que *Magelona johnstoni*, soit moins adaptée à vivre au sein de sables mobiles. Moins résistantes aux conditions hydrodynamiques, elle aurait besoin d'abris pour se maintenir dans le secteur. Nous la retrouvons en effet soit en association avec les fortes densités de *Magelona johnstoni* soit dans les fonds plus grossiers proches du Parfond. De plus, son absence au sein des zones les plus proches de l'embouchure laisse envisager sa sensibilité à la dessalure des eaux.



... *Lanice conchilega*, annélide polychète tubicole aussi appelée "ver des sables", dont la niche n'a pas été caractérisée par ces analyses, peut être rencontré au sein de types sédimentaires variés, avec une préférence pour les sables moyens à fins.

Dans la partie belge de la Mer de Nord, il est rencontré au sein de types sédimentaires variés, mais il montre une préférence pour les sédiments fins à moyens avec une teneur en fines relativement importante (entre 10 % et 40 %) (Degraer et *al.*, 2006). En baie des Veys, dans la partie occidentale de la baie, une population intertidale est bien développée au sein d'une zone de conchyliculture, et modifie le substrat en favorisant l'accumulation de sables sur son aire de distribution (Ropert, 1999; Ropert et Dauvin, 2000). Ropert et Dauvin (2000) ont suggéré que cette espèce était capable d'être transportée par des conditions hydrodynamiques particulières, et ceci sur plusieurs kilomètres. Il est d'ailleurs précisé que des échanges entre la population intertidale et la population subtidale peuvent exister, contribuant au maintien des populations intertidales.

Si l'on considère les distributions spatiales d'abondances de cette espèce au cours du temps, nous ne pouvons pas observer de tendance particulière. Elle se répartie sur une majeure partie du secteur étudié sans que des "spots" d'abondance ne soient identifiables. Nous remarquerons néanmoins que les fonds ensablés en face de Deauville abritent toujours *Lanice conchilega*, même si ses abondances ne sont pas si élevées en comparaison avec les fortes valeurs parfois retrouvées en intertidal. Dans la partie Belge de la Mer du Nord Van Hoey et *al.* (2004) parlent de 228 ind. / m<sup>2</sup>, elles peuvent parfois atteindre des valeurs supérieures à 1500 ind. / m<sup>2</sup> (Rabaut et *al.*, 2007). En baie des Veys, Ropert et Dauvin (2000) ont observé, suite à sa prolifération, des valeurs d'abondances qui atteignaient les 7000 ind.m<sup>2</sup>.

A l'échelle de la baie de Seine Orientale et en tenant compte des années 2008-2009, *Lanice conchilega* a sensiblement la même aire de distribution qu'*Owenia fusiformis*, avec de plus fortes abondances, également présentes en baie de Seine Sud-orientale. Si l'on s'intéresse à la



répartition spatiale de cette espèce à l'échelle de la baie de Seine Sud-orientale, nous pouvons remarquer que les plus fortes valeurs d'abondance caractérisent des stations qui sont situées à l'opposé de celle représentées par les plus fortes abondances d'*Owenia fusiformis*. Ce schéma se retrouve pour les deux années prospectées avec cependant une légère extension de sa couverture spatiale et de plus fortes abondances en 2009.

Si la compétition inter spécifique, la compétition pour l'espace ou encore la granulométrie des sédiments peut être avancée comme explication de ce schéma de distribution, l'examen des photographies des sédiments peut apporter un autre point de vue. Il a en effet été observé dans ce secteur une proportion sableuse en recouvrement de faciès sous jacents variés (sables coquilliers, mélanges sablo-vaseux plus ou moins compactés) généralement plus épaisse en 2009 qu'en 2008. La présence de cette couverture sableuse plus épaisse ainsi qu'une diminution importante des abondances d'*Owenia fusiformis* pourraient avoir profité à un meilleur recrutement du tubicole *Lanice Conchilega*. Cependant les individus récoltés en 2009 étaient de petites tailles, et cette population ne constitue pas une véritable "banquette" à Lanices. La couverture sableuse de surface sur laquelle elles se sont développées n'est peut être pas assez stable pour permettre leur survie sur le plus long terme, l'examen de la situation en 2010 pourrait confirmer ou non leur installation sur ces fonds. De plus, cette espèce colonise la quasi-totalité de l'estran de la côte du Calvados jusqu'à la baie des Veys (Ropert, 1999), il est ainsi possible que les individus récoltés sur les fonds subtidaux de la baie de Seine Orientale soient issus de populations intertidales. Quelques individus pourraient avoir été arrachés de leur substrat sur ces petits fonds soumis à de fortes contraintes hydrodynamiques, et piégés en baie de Seine Orientale.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La difficulté majeure à l'étude rigoureuse des relations entre les différentes composantes de l'écosystème "baie de Seine Orientale – embouchure" pour en comprendre le fonctionnement et l'évolution, repose ici 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 (i) des plus fortes valeurs d'abondances observées en 2008-2009, du au nombre important de recrues et (ii) de la maille de tamisage différente (1 mm pour COLMATAGE et 2 mm pour PECTOW) qui influence aussi bien le nombre d'espèces que d'individus récoltés (Bachelet, 1987 ; Schlacher et Wooldridge, 1996b). Aussi, la grille d'échantillonnage de COLMATAGE diffère et la couverture spatiale est légèrement plus étendue aux sables dunaires du large et aux fonds envasés des Fosses Nord et Sud de l'embouchure de la Seine. 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. Face à la diversité des résultats acquis, tant au niveau des méthodologies employées qu'au niveau des échelles spatio-temporelles d'études choisies, il fallait concevoir d'aborder la question de la compréhension de l'organisation du système sous un angle général. Située à l'échelle du système "baie de Seine Orientale – embouchure", mon approche s'est basée sur l'observation de la reproductibilité de phénomènes ou de constats pour à la fois dégager les schémas généraux de son organisation et en trouver les facteurs structurants principaux.

Une synthèse ses 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 d'offrir un point de vue de l'organisation générale du système "baie de Seine Orientale – embouchure". 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 (i) 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 (ii) 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, 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 nous avons pu le constater au travers de l'analyse texturale des sédiments. La structuration de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* en zones de fortes richesses spécifiques et abondances selon une bande littorale d'Ouistreham à Antifer, peut s'apparenter à une zone écotonale (zone de transition écologique entre deux écosystèmes (Kolasa et Zalewski, 1995). D'après Van der Maarel (1990), les écotones sont d'ailleurs toujours plus pauvres en espèces spécifiques qu'en espèces des milieux adjacents ou ubiquistes.

Ce point de vue général de l'organisation de la macrofaune benthique dans le contexte hydro-morpho-sédimentaire du système "baie de Seine orientale – embouchure", peut servir de base pour aborder les questions posées en partie introductive. Il est proposé de revenir aux questions posées 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 mis clairement en évidence de relations claires entre les assemblages de la macrofaune benthique, réalisés selon différentes méthodologies, et les sédiments. Comme évoqué par Ghertso (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 ces études, seuls les sables et les vases sont bien représentés et sont en mélange parfois hétérogènes.

L'étude menée ici va également dans ce sens. En effet, les assemblages faunistiques issus de l'analyse PACP sur les données 2008-2009 de COLMATAGE, réalisée à l'échelle du système "baie de Seine Orientale – embouchure", 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 (i) 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, (ii) d'un ensemble bien représenté par *Macoma balthica* au sein des fonds envasés à l'embouchure, (iii) de fonds sableux dunaires au large et (iv) 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 au sein de cette communauté 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. Elles ne reflètent donc pas uniquement un habitat sédimentaire particulier, mais aussi l'existence d'autres facteurs significativement structurants. Nous avons pu mettre 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 : (i) une migration ontogénique verticale des larves en relation avec la circulation en double couche estuarienne ; (ii) les faibles courants résiduels et (iii) l'existence 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" (Lagadeuc, 1992; Thiébaud, 1994, 1996; Thiébaud et *al.*, 1994, 1995, 1996; Olivier et *al.*, 1996b; Olivier, 1997; Ellien et *al.*, 2000, 2004; Barnay, 2003).

Puisque les analyses multivariées utilisées se montrent sensibles à la nature des données, notamment aux fortes abondances parfois rencontrées de certaines espèces et/ou aux richesses spécifiques, il semble qu'aborder l'étude des relations faune-sédiments selon une approche basée sur l'analyse d'assemblages faunistiques ne soit pas pertinent. De plus, les espèces étant plus ou moins tolérantes ou sensibles à différents facteurs structurants, qu'ils soient de nature sédimentaire, hydrologiques ou hydrodynamique, possèdent leur propre schéma de répartition et nous avons pu nous rendre compte, au travers de quelques exemples, que les aires de distribution des espèces peuvent être en recouvrement.

Enfin, 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 entre autre 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 réplikat 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 (i) par une dynamique hydro-morpho-sédimentaire complexe et (i) par les fortes variations spatio-temporelles d'abondances qui caractérise certaines espèces qui y vivent, il est difficile de percevoir, à partir des grilles d'échantillonnage de PECTOW, si des changements significatifs se sont produits ces 20 dernières années à l'échelle du système " baie de Seine Orientale – embouchure". 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 grande 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, nous avons pu entrevoir, dans l'ensemble, une augmentation des teneurs en sables moyens et une diminution des teneurs en sables fin. Cependant, au regard de ces constats et de la grande prudence à accorder aux données de granulométrie, il n'était pas possible de conclure clairement à un bilan positif de l'envasement dans ce secteur. A nouveau, seule la cartographie fine des faciès sédimentaires établie par Lesourd (non publiée) sur la base des données récentes 2008-2009 permet de confirmer l'envasement des fonds de l'embouchure et des fonds subtidaux 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 "baie de Seine Orientale – embouchure", sembleraient d'ailleurs tendre en faveur d'un envasement au sein de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* par rapport à la situation des années 1970 (Cabioch et collaborateurs). 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. Une 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 "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 la prolifération importante de 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 i) le rôle de piéger des particules fines par l'émergence de ses tubes à la surface du substrat et ii) 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 notre 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 tendre à 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 sédiments) au sein du système "baie de Seine Orientale – embouchure", plusieurs questions se posent quant à la stratégie d'échantillonnage à adopter. Ces questionnements tournent 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 ce travail de thèse, 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 rendra difficile (i) l'approfondissement de nos 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 (ii) 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 sédiments) nécessite la prise en compte d'une fenêtre temporelle large. Cependant, cela ne veut pas forcément dire qu'une image tous les 10 ans serait suffisante, faire ce choix c'est prendre les risques (i) de ne plus déceler de tendance à long terme, au regard de la forte variabilité inter-annuelle caractérisant à la fois la macrofaune benthique et les sédiments, et (ii) qu'un évènement exceptionnel se produise l'année prévue de l'échantillonnage, ce qui rendrait difficile l'interprétation des résultats.

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 ne constituent que les points majeurs qui me semblent pertinents à prendre en compte, en me basant sur les caractéristiques propres à la macrofaune benthique, et sur les connaissances antérieures et nouvellement acquises de son organisation au sein du système "baie de Seine Orientale – embouchure", marqué par une forte dynamique hydro-morpho-sédimentaire. Il sera également nécessaire de considérer les protocoles existants 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 (Dauvin et Vasset, 2011) pour que les études futures portant sur ce compartiment soient rendues plus comparables. 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 est prévu 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>.

Si la DCE préconise, pour caractériser les sédiments, l'échantillonnage d'un réplicat supplémentaire dédié à une analyse granulométrique par tamisage (norme AFNOR), j'ajouterais qu'une amélioration de ce protocole doit être envisagée pour permettre une meilleure interprétation des résultats concernant l'étude des relations macrobenthos – sédiments. Il est proposé dans l'encart suivant quelques propositions d'amélioration de ce protocole. Il y est discuté de la possibilité de supprimer le réplicat dédié à l'analyse granulométrique dans le cas d'une structure sédimentaire complexe. Si cela n'est pas envisageable, il semble néanmoins indispensable de prendre en compte la notion complémentaire de texture sédimentaire.

#### **ENCART**

##### ***Adaptation du protocole d'échantillonnage des sédiments en baie de Seine Orientale, en fonction de la nature et texture sédimentaire observée sur chaque prélèvement réalisé, et dans le but d'améliorer les connaissances des relations benthos - sédiments***

L'adaptation de ce protocole a pour but principal de mieux caractériser les relations faune-sédiments au sein d'un milieu marqué par une grande hétérogénéité, et doit tendre vers un gain de temps.

Dans le cas où les sédiments sont très homogènes dans leur texture, et que cette homogénéité est répliquée, une granulométrie Laser peut suffire à caractériser correctement une station. Dans ce cas, un gain de temps est acquis pour deux raisons : (i) un prélèvement à la benne Van Veen n'est pas nécessaire puisque qu'un très faible volume de sédiments suffit, et peut être prélevé dans un réplicat dédié à l'analyse faunistique sans qu'il y ait de répercussion majeure ; (ii) le protocole utilisé pour l'analyse granulométrique Laser en laboratoire prend beaucoup moins de temps que celui utilisé pour une granulométrie par tamisage.

Nous avons pu montrer que pour étudier les relations entre la faune et son environnement sédimentaire, choisir de prélever un réplikat dédié à l'analyse granulométrique qui soit supplémentaire aux cinq autres dédiés à l'analyse faunistique n'était parfois pas pertinent. Une hétérogénéité à petite échelle comme celle du prélèvement lui-même peut exister, et se répercuter à l'échelle de la station, d'autant plus que la distance entre les réplikats, variable en fonction de la dérive du bateau, peut être importante. Dans ces zones caractérisées par une organisation sédimentaire complexe (liée à la stratification et à la texture des sédiments), l'ajout d'un réplikat spécialement dédié à une analyse granulométrique ne se semble pas indispensable compte tenu du risque qu'il ne soit pas représentatif des autres réplikats prélevés pour analyse faunistique. Il est alors envisageable que ce dernier puisse être supprimé du protocole d'échantillonnage. Ainsi, choisir de réaliser plusieurs granulométries sur les échantillons dédiés à l'analyse faunistique (sur chaque réplikat et/ou sur un même réplikat) peut être envisagé, ceux-ci pouvant comporter une structuration complexe traductible par une dualité en termes d'habitats différents pour la faune. Bien entendu multiplier les analyses granulométriques par tamisage ne serait pas envisageable pour des questions essentiellement financières et de temps. D'autre part, les volumes nécessaires pour ce traitement sont trop importants pour se permettre un sous-échantillonnage dans les prélèvements dédiés à l'analyse faunistique, au risque de sous-échantillonner trop d'individus qui ne seront alors pas comptabilisés. Néanmoins, il peut être envisagé de réaliser des granulométries Laser dont l'avantage est double : la rapidité de sa mise en œuvre et le très faible volume de sédiments nécessaire.

Cependant, il faut rester prudent face à cette proposition, cela doit dépendre des sédiments à analyser et ne doit pas être systématique. En effet, nous pourrions par exemple passer à côté de fractions plus grossières (> 2mm) qui ne sont pas prises en compte dans le traitement de l'échantillon. De plus, nous avons pu mettre en avant la complémentarité des deux techniques d'échantillonnage ; le prélèvement à la benne Schipeck, privilégiant la couverture de surface, et à la benne Van Veen, prélevant plus en profondeur et permettant ainsi d'évaluer la présence d'une structuration verticale. Le choix doit se faire en fonction des sédiments prélevés et cette approche nécessite une bonne connaissance du milieu et une bonne vision d'ensemble.

Dans le cas d'une organisation verticale pressentie des sédiments, il peut également être choisi de réaliser un carottage pour apprécier l'épaisseur des différentes strates sédimentaires. Le carottier Reineck ou encore le carottier Flusha peuvent répondre à cette problématique. Cette information apporterait beaucoup plus d'objectivité dans la caractérisation des fonds sédimentaires et permettrait d'améliorer les connaissances relatives aux relations faune-sédiments.

La prise d'une photographie de chaque prélèvement est dans tous les cas une démarche à conserver et doit s'accompagner d'une description précise des sédiments juste après leur arrivée sur le pont. Plusieurs paramètres doivent être pris en compte dans cette description, comme montré lors de l'analyse texturale des fonds sédimentaires en 2008 et 2009 à l'échelle de COLMATAGE. Il semble important que cette phase de description se fasse directement à bord pour qu'elle en soit meilleure. En effet, cette démarche est tributaire de la qualité de la photographie (reflets, propreté de l'objectif, luminosité, netteté...), et la notion de texture n'en sera que mieux expertisée.

Il est à noter que le choix du protocole à suivre dans le cas de structures complexes doit à la fois i) être cohérent par rapport à la complexité que nous connaissons de ce système (ii) s'appuyer sur les descriptions faites des sédiments prélevés et (ii) se baser sur la volonté d'améliorer les connaissances relatives aux relations faune-sédiments.

Puisque les décisions sont à prendre en fonction des sédiments prélevés, il est nécessaire que des spécialistes sensibilisés à la problématique de l'étude de ces relations soient présents. Il faudra pour cela privilégier la nature pluridisciplinaire et la mutualisation des moyens dans l'organisation des campagnes scientifiques de prélèvements à la mer.

Alors que le compartiment benthique a été bien étudié jusqu'à aujourd'hui (Dauvin, 2010), il est avant tout indispensable, pour aboutir à une proposition de stratégie à long terme du compartiment benthique qui soit précise et pertinente, de privilégier la concertation et l'échange de points de vue entre les différents acteurs des différentes disciplines concernées. Cela concerne, les sédimentologues, les ichtyologues, les hydrodynamiciens, et les modélisateurs. Si dans le cadre du projet COLMATAGE les relations entre la macrofaune benthique et les sédiments ont bien été étudiées, il reste encore à fournir des efforts pour étudier les relations entre ce compartiment et celui des poissons. Cela constitue une perspective incontournable à ce travail, pour à la fois rechercher les facteurs structurants communs aux composantes ichtyologique, macrobenthique, hydrodynamique et sédimentaire, et apprécier le rôle fonctionnel des communautés benthiques en termes de chaîne trophique. Les campagnes d'échantillonnage de COLMATAGE ont été volontairement axées sur la pluridisciplinarité pour atteindre ces objectifs.

Il est à noter que l'étude des changements à long terme ne peut se passer des questionnements relatifs à la réponse de la faune aux changements climatiques globaux. Il serait alors envisageable de choisir, parmi les zones les moins impactées par l'envasement et par les contraintes anthropiques, des points de suivi pour aborder cette problématique.













\*\*\*\*\*














Une partie des données des campagnes communes de COLMATAGE 2008-2009 ont déjà été utilisées dans le cadre de publications (Annexe 12). L'une portant sur la présence nouvelle en baie de Seine Orientale, d'un petit décapode vasicole *Asthenognathus atlanticus*, l'autre portant sur la réponse de divers indices benthiques à diverses pressions humaines.














Si les relations entre les différentes composantes du domaine benthiques sont mal établies aujourd'hui, cela découle entre autre de la difficulté actuelle à appréhender: i) les dynamiques propres à chacune d'entre-elles qui se révèlent complexes dans le cadre de ces écosystèmes côtiers en réponse à de nombreux forçages, qu'ils soient biotique ou abiotiques, ii) la synthèse de l'ensemble des interactions entre les différents descripteurs d'un écosystème donné, ces dernières s'exprimant à de échelles d'espaces et de temps variées et interconnectées à différents niveaux. D'autre part, au-delà de l'importance de la mise en commun de données propres à chacune des disciplines pour statistiquement en effectuer les couplages, notre capacité à comprendre l'organisation et le fonctionnement des écosystèmes dépendra de la réussite des échanges entre scientifiques concernés. Ce succès implique une véritable collaboration scientifique pluridisciplinaire en termes d'échanges et de transmission de savoirs.















## BIBLIOGRAPHIE


-  **Alizier S., 2005.** Evolution spatio-temporelle de l'épifaune vagile et de l'endofaune du peuplement des cailloutis à épibiose sessile dans le Détroit du Pas de Calais. *Diplôme Supérieur de Recherche de l'Université de Lille 1*, 99 p.
-  **Allen J.R.D., 1993.** An introduction to estuarine lithosomes and their controls. *Sedimentology review*, 1: 123-138.
-  **Anquez T., 2011.** Répartition spatial et variabilité inter-annuelle des classes d'âge et de l'abondance chez quatre espèces benthiques subtidales abondantes en baie de Seine Orientale. *Rapport de stage de M1 de l'Université de Lille 1*, 35 p.
-  **Armonies W., 1994.** Turnover of postlarval bivalves in sediments of tidal flats in Königshafen (German Wadden Sea). *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 4: 291-297.
-  **Avoine J., 1981.** L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. *Thèse de troisième cycle de l'université de Caen*, 236 p.
-  **Avoine J., 1986.** Sediment exchanges between the Seine estuary and its adjacent shelf. *Journal of the Geological Society, London*, 144: 135-348.
-  **Avoine J., 1994.** Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. *Rapport d'étude, IFREMER-Port Autonome du Havre, Brest*, 153 p.
-  **Avoine J. & Crevel L., 1986.** Influence des apports fluviaux en baie de Seine. *Actes de Colloques (GRECO-MANCHE). IFREMER, Université de Caen*, 4: 125-134
-  **Avoine J., Crevel L., Dubrulle L., Boust D. & Guegeniat P., 1984.** Sédiments et dynamique sédimentaire en baie de Seine. *XVIIIe journées de l'hydraulique, Marseille*, I.3.1-I.3.2.
-  **Avoine J., Caillot A., Hoslin R., Larssonneur C., Massias J. & Quesney M., 1986a.** Contribution des traceurs radioactifs à l'étude des mouvements sédimentaires en baie de Seine. *La baie de Seine (GRECO-MANCHE). IFREMER, Université de Caen*, 211-218.
-  **Avoine J., Boust D. & Guillaud J.F., 1986b.** Flux et comportement des contaminants dissous et particuliers dans l'estuaire de la Seine (France). *Rapport P-V, Réunion du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, 186 : 392-411.
-  **Avoine J. & Larssonneur C., 1987.** Dynamics and behaviour of suspended sediment in macrotidal estuaries along the south coast of the English Channel. *Continental Shelf Research* 7 (11/12), 1301-1305.


-  **Avoine J., Lesueur P. & Rouault T., 1996.** Evolution morphologique et couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Actualisation et fluctuations. *Rapport Programme Seine-Aval 1995/FIN-1, Thème Hydrodynamique et transport sédimentaire*, 2-20.
-  **Aminot A., Guillaud J.F. & Kérouel R., 1997.** La baie de Seine : hydrologie, nutriments et chlorophylle (1978-1994). *Repère Océan, 14. IFREMER, Brest*, 148 p.
-  **Bachelet G. & Cornet M., 1981.** Données sur le cycle biologique d'*Abra alba* (mollusque bivalve) dans la zone sud-Gascogne. *Annales de l'Institut Océanographique*, 57 : 111-123.
-  **Bachelet G., 1987.** Processus de recrutement et rôle des stades juvéniles d'invertébrés dans le fonctionnement des systèmes benthiques de substrat meuble en milieu intertidal estuarien. *Thèse d'Etat de l'Université de Bordeaux I*, 478 p.
-  **Barbault R., 1997.** *Ecologie générale – Structure et fonctionnement de la biosphère*. 4<sup>ème</sup> édition. Masson, Paris, 286 p.
-  **Barnay A.S., 2003.** Structure des peuplements de sables fins plus ou moins envasés en Manche : échelles spatiales et biodiversité. *Thèse de doctorat de l'université Paris VI*, 250 p.
-  **Barnay A.S., Ellien C., Gentil F. & Thiébaud E., 2003.** A model study on variations in larval supply: Are populations of the polychaete *Owenia fusiformis* opened or closed? *Helgoland Marine Research*, 56: 229-237.
-  **Belsher T., Hamon D., Jouan G., Cabioch L. & Retière C., 1976.** Etude écologique d'avant-projet sur le site de Flamanville. Electricité de France. *Centre National pour l'Exploitation des Océans - Unité Littorale*, 125 p.
-  **Blanc L., 2000.** Données spatio-temporelles en écologie et analyses multi-tableaux : examen d'une relation. *Thèse de Doctorat de l'université de Lyon I*, 266p.
-  **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 réflexion sur son observation à long terme. *Rapport de stage de M1 de l'Université des Sciences et technologies de Lille1*, 33 p.
-  **Bouma H., Duiker J.M.C., de Vries P.P., Herman P.M.J. & Wolff W.J., 2001.** Spatial pattern of early recruitment of *Macoma balthica* and *Cerastoderma edule* in relation to sediment dynamics on a highly dynamic intertidal sandflat. *Journal of Sea Research*, 45: 79-93.
-  **Bouxin G., 2008.** Analyse statistique des données de végétation. Les techniques d'analyse factorielle et d'ordination. <http://users.skynet.be/Bouxin.Guy/ASDV/ASDV.htm>, 82 p.
-  **Breton G., Vincent T., Painblanc A & Duchemin A., 2005.** L'endofaune des bassins du port du Havre (Manche orientale). *Bulletin de la société géologique de Normandie et des amis du muséum du Havre*, 92(1): 5-18.


-  **Cabioch L., 1968.** Contribution à la connaissance des peuplements benthiques de la Manche occidentale. *Cahiers de Biologie Marine*, 9 : 493-720.
-  **Cabioch L. & Gentil F., 1975.** Distribution des peuplements benthiques dans la partie orientale de la baie de Seine. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 280 : 571-574.
-  **Cabioch L. & Glaçon R., 1975.** Distribution des peuplements benthiques en Manche Orientale, de la Baie de Somme au Pas-de-Calais. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, 280 : 491-494.
-  **Cabioch L. & Glaçon R., 1977.** Distribution des peuplements benthiques en Manche Orientale, du Cap d'Antifer à la Baie de Somme. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, 285 : 209-213.
-  **Cabioch L., Gentil F., Glaçon R. & Retière C., 1977.** Le macrobenthos des fonds meubles de la Manche : distribution générale et écologie. In Keegan B.F., Ceidigh P.O. & Boaden P.J.S. (ed.) *Biology of benthic organisms. 11<sup>th</sup> European symposium on marine biology Galway*. Pergamon Press, Oxford, 115-128.
-  **Chabert d'Hières G. & Le Provost C., 1978.** Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche. *Annales hydrographiques*, 46 : 5-35.
-  **Chessel D., 2006.** Calcul de l'Outlier Mean Index. *Consultation statistique avec le logiciel R*, 13p.
-  **Chessel, D., Gimaret C., 2007.** Niches écologiques et couplages de tableaux. *Fiche thématique, librairie ADE-4*, 4.7: 34 p.
-  **Colwell R.K. & Coddington J.A., 1994.** Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B: Biological Sciences*, 345: 101-118.
-  **Connor D.W., Allen J.H., Golding N., Howell K.L., Lieberknecht L.M., Northen K.O. & Reker J.B., 2004.** The marine Habitat Classification for Britain and Ireland, Version 04.05. *JNCC, Peterborough*, <http://www.jncc.gov.uk/MarineHabitatClassification>.
-  **Cook E.J., Jahnke M., Kerckhof F., Minchin D., Faasse M., Boos K. & Ashton G., 2007.** European expansion of the introduced amphipod *Caprella mutica* Schurin 1935. *Aquatic invasions*, 2 (4): 411-421.
-  **Crevel L., 1983.** Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la Baie de Seine. *Thèse de troisième cycle de l'Université de Caen*, 186 p.
-  **Crevel L., 1985.** La dynamique sédimentaire en baie de Seine nord-orientale, fluctuations et évolution de la couverture meuble. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER-Université de Caen, 193-200.


-  **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 p.
-  **Dauvin J.C., 1986.** Biologie, dynamique et production d'une population d'*Abra alba* (Wood) (mollusque bivalve) de la baie de Morlaix (Manche occidentale). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 97 :151-180.
-  **Dauvin J.C. & Gillet P., 1991.** Spatio-temporal variability in population structure of *Owenia fusiformis* Delle Chiaje (Annelida : Polychaeta) from the Bay of Seine (eastern English Channel). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 152 : 105-122.
-  **Dauvin J.C., 1992.** Cinétique du recrutement et croissance des juvéniles d'*Owenia fusiformis* Delle Chiaje en Baie de Seine (Manche orientale). *Oceanologica Acta*, 15: 187-196.
-  **Dauvin J.C., Dewarumez J.M.D., Elkaim B., Bernardo D., Fromentin J.M. & Ibanez F., 1993.** Cinétique de *Abra alba* (mollusque bivalve) de 1977 à 1991 en Manche-Mer du Nord, relation avec les facteurs climatiques. *Oceanologica acta*, 16 :413-422.
-  **Dauvin J.C., 1999.** Mise à jour de la liste des espèces d'amphipodes (Crustacea : Peracardia) présents en Manche. *Cahiers de Biologie Marine*, 40: 165-183.
-  **Dauvin J.C., Costil K., Duhamel S., Hocdé R., Mouny P. & de Roton G., 2002.** Patrimoine biologique et chaînes alimentaires. *Fascicule du Programme Seine-Aval*, 7, IFREMER, 46 p.
-  **Dauvin J.C., Dewarumez J.M. & Gentil F., 2003.** Liste actualisée d'annélides polychètes présentes en Manche. *Cahiers de Biologie Marine*, 44: 67-95.
-  **Dauvin J.C., Ruellet T., Thiébaud E., Gentil F., Desroy N., Janson A.L., Duhamel S., Jourde J. & Simon S., 2007.** The presence of *Melinna palmata* (Annelida : Polychaeta) and *Ensis directus* (Mollusca : Bivalvia) related to sedimentary changes in the Bay of Seine (English Channel, France). *Cahiers de Biologie Marine*, 48: 391-401.
-  **Dauvin J.C., Janson A.L., Alizier S., Aulert C., Bessineton C., Cuvilliez A., Denis L., Garcia C., Jourde J., Lesourd S., Lozach S., Morin J., Ruellet T., Spilmont N. & Tous Rius A., 2010.** Le benthos de l'estuaire de la Seine. *Fascicule du Programme Seine Aval*, 2.4, 70 p.
-  **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. *Seine-Aval*, 72 p.
-  **Davoult D., Dewarumez J.M., Prygiel, J. & Richard A., 1988.** Carte des peuplements benthiques de la partie française de la Mer du Nord. *In Prygiel J., Davoult D., Dewarumez J.M., Glaçon R. & Richard A., 1988.* Description et richesse des peuplements benthiques de la


partie française de la Mer du Nord, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 306-III : 5-10.


 **Degraer S., Wittoeck J., Appeltans W., Cooreman K., Deprez T., Hillewaert H., Hostens K., Mees J., Vanden Berghe E. & Vincx M., 2006.** The macrobenthos atlas of the Belgian part of the North Sea. *Belgian Science Policy. D/2005/1191/3*. ISBN 90-810081-6-1., 164 p.


 **Den Boer P.J., 1968.** Spreading of risk and stabilisation of animals numbers. *Acta Biotheorica*, 18: 165-194.


 **Desroy N., Warembourg C., Dewarumez J.M. & Dauvin J.C., 2002.** Macrobenthic resources of the shallow soft-bottom sediments in the eastern English Channel and southern North Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 60: 120-131.


 **Dewarumez J.M., Quisthoudt C. & Richard A., 1986.** Suivi pluriannuel du peuplement à Abra alba dans la partie méridionale de la Mer du Nord (Région Dunkerque-France). *Hydrobiologia*, 142 : 187-197.


 **Dolédec S., Chessel D. & Gimaret C., 2000.** Niche separation in community analysis: a new method. *Ecology*, 81: 2914-2927.


 **Dubrulle-Brunaud C., 2007.** Les sédiments fins dans un système macrotidal actuel (continuum Seine – baie de Seine) : caractérisations géochimiques et minéralogiques, identification des sources. *Thèse de doctorat de l'Université de Rouen*, 332 p.

 **Ellien C., Thiébaud E., Barnay A.S., Dauvin J.C., Gentil F. & Salomon J.C., 2000.** The influence of variability in larval dispersal on the dynamics of a marine metapopulation in the eastern Channel. *Oceanologica Acta*, 23: 423-442.


 **Ellien C., Thiébaud E., Dumas F., Salomon J.C. & Nival P., 2004.** A modelling study of the respective roles of hydrodynamic process and larval mortality on larval dispersal and recruitment of benthic invertebrates: example of *Pectinaria koreni* (Annelida: Polychaeta) in the Bay of Seine (English Channel). *Journal of Plankton Research*, 26: 117-132.


 **Elmgren R., Ankar S., Marteleur B. & Ejdun G., 1986.** Adult interference with postlarvae in soft sediments: the Pontoporeia – Macoma example. *Ecology*, 67: 827-836.


 **Ehrhold A., Blanchet A., Hamon D., Gaffet J.D., Augris C. & Duval F., 2008.** Réseau de surveillance benthique (REBENT) – Région Bretagne. Approche sectorielle subtidale : Identification et caractérisation des habitats benthiques du secteur Vilaine. *RST/IFREMER/DYNECO/Écologie benthique/08-03/REBENT*, 45p.


 **Ehrhold A., Hamon D., Chevalier C., Gaffet J.D., Caisey X., Blanchet A. & Alix A.S., 2010.** Réseau de surveillance benthique (REBENT) – Région Bretagne. Approche


sectorielle subtidale : Identification et caractérisation des habitats benthiques du secteur Quiberon. *RST/IFREMER/DYNECO/Ecologie benthique/10-03/REBENT*, 81p.


 **Even S., Harvier J.F., Bacq N., Thouvenin B., Garnier J. & Servais P., 2007.** Etude GIP : Modélisation des cycles biogéochimiques majeurs en estuaire de Seine. *Rapport Scientifique Seine-Aval. Thème 3 : Tableau de bord et indicateurs opérationnels*, 56 p.

 **Fairbridge R.W., 1980.** The estuary: its definition and geodynamic cycle. *In: Chemistry and biogeochemistry of estuaries. Olausson E. & Cato I. (Eds), New York: Wiley and Sons*, 1-35.


 **Fauchald K. & Jumars P.A., 1979. The diet of worms: a study of polychaete feeding guilds.** *Oceanography and Marine Biology an Annual Review*, 17:193-284.


 **Foveau A., 2008.** Long-term changes in the sessile epifauna of the Dover Strait pebble community. *Journal of Oceanography, Research and Data*, 1: 1-11.


 **Foveau A., 2009.** Habitats et communautés benthiques du bassin oriental de la Manche : état des lieux au début du XXI<sup>ème</sup> siècle. *Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1*, 308 p.


 **Folk, R.L., 1954.** The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature. *Journal of Geology*, 62 (4): 344-359.


 **Frontier S. & Pichod-Viale D., 1998.** Ecosystèmes – structure, fonctionnement, évolution. *Masson, Paris*, 447 p.


 **Garcia C., 2010.** Approche fonctionnelle des communautés benthiques du bassin orientale de la Manche et du sud de la Mer du Nord. *Thèse de doctorat de l'Université de Lille 1*.

 **Garnaud, S., 2003.** La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle macrotidale : la baie de Seine sud-orientale (France). *Thèse de doctorat de l'université de Caen*, 307 p.













 **Garnaud S., Lesueur P., Lesourd S., Poupinet N. & Brun-Cottan J.C., 2002.** Caractérisation des variations lithologiques saisonnières des sédiments de la Baie de Seine orientale ; impact des crues de la Seine (France). *Comptes rendus Géoscience*, 334 : 323-330.













 **Garnaud S., Garlan T., 2005.** Bilan de l'envasement en Baie de Seine sud-orientale depuis deux cents ans. *Mappemonde*, 80, 10 p.















 **Gee J.M. & Warwick R.M., 1996.** A study of global biodiversity patterns in the marine motile fauna of hard substrata. *Journal of The Marine Biological Association of United Kingdom*, 76: 117-184.













 **Gentil F., 1976.** Distribution des peuplements benthiques en Baie de Seine. *Thèse de troisième cycle de l'Université Paris VI*, 70 p.















-  **Gentil F., 1980.** Les peuplements benthiques de la baie de Seine : caractères généraux et liaisons biogéographiques. *Compte Rendu 105<sup>ème</sup> congrès national des Sociétés Savantes, Caen, Sciences III*, 125-138.
-  **Gentil F., 1986.** Dynamique de population de *Cutellus pellucidus* et *Tellina fabula* (mollusques bivalves) du peuplement des sables fins envasés de la baie de Seine Orientale (Manche). *Haliotis*, 15 : 135-143.
-  **Gentil F., Irlinger J.P., Elkaim B. & Proniewski F., 1986.** Premières données sur la dynamique du peuplement macrobenthique des sables fins envasés à *Abra alba* de la Baie de Seine orientale. *Actes de colloques, IFREMER*, 4 : 409-420.
-  **Gentil F. & Dauvin J.C., 1989.** Etude allométrique de la Polychète *Owenia fusiformis* Delle Chiaje. *Journal de Recherche Océanographique*, 14 : 58-60.
-  **Gentil F. & Cabioch L., 1997a.** Carte des peuplements macrobenthiques de la Baie de Seine et Manche centrale sud. Carte et notice explicative, 18 p.
-  **Gentil F. & Cabioch L., 1997b.** Les biocénoses subtidales macrobenthiques de la Manche, conditions écologiques et structure générale. In *Les biocénoses marines et littorales françaises des côtes Atlantique, Manche et Mer du Nord, synthèse, menaces et perspectives*, 28, Dauvin, J.C. (ed.). Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 349 p.
-  **Ghertsos K., 2002.** Structure spatio-temporelle des peuplements de la baie de Seine à plusieurs échelles d'observation. *Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille I*, 144 p.
-  **Glémarec M., 1964.** Bionomie benthique de la partie orientale du Golfe du Morbihan. *Cahiers de Biologie marine*, 5: 33-96.
-  **Goodhart C.B., 1939.** Notes on the Bionomics of the Tube Building Amphipod, *Leptocheirus pilosus* Zaddach. *Journal of the Marine Association of the United Kingdom*, 23 : 311-325.
-  **Grosjean P. & Ibanez F., 2002.** PASTECS – Package for Analysis of Space-Time Ecological Series. *Manuel de l'utilisateur de la librairie de fonctions pour R et pour S+*, 1.1-1 pour R v. 1.6.0 : 290 p.
-  **Guerra-García J.M., García-Gómez J.C., 2006.** Recolonization of defaunated sediments: fine *versus* gross sand and dredging *versus* experimental trays. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68: 328-342.
-  **Guillou M. & Hily C., 1983.** Dynamics and Biological Cycle of a *Melinna palmata* (Ampharetidae) Population During the Recolonisation of a Dredged Area in the Vicinity of the Harbour of Brest (France). *Marine Biology*, 73: 43-50.














-  **Hecq J.H., Mingelbier M., Goffart A., Brylinski J.M. & Djenidi S., 1992.** Caractéristiques écohydrographiques de la baie sud de la Mer du Nord en regime d'été. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 61 : 79-97.
-  **Heip C., Basford D., Craeymeersch J.A., Dewarumez J.M., Dörjes J., de Wilde P.A., Duineveld G., Eleftheriou A., Herman P.M.J., Niermann, U., Kingston P., Künitzer A., Rachor E., Rumohr H., Soetaert K., Soltwedel T., 1992.** Trends in biomass, density and diversity of North Sea macrofauna. *ICES Journal of Marine Science*, 49: 13-22.
-  **Hily C. & Glémarec M., 1999.** Environnement Naturel de l'Iroise. Bilan des connaissances et Intérêt Patrimonial. *Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement/UBO*, 83p.
-  **Hinschberger F., 1996.** Les côtes bas-normandes au péril de la mer. In *Noroi, La Basse-Normandie, études normandes n°1 et 2*, 16 : 315 p.
-  **Holme N.A., 1961.** The bottom fauna of the English Channel. Part I. *Journal of the Marine Biological Association of United Kingdom*, 41: 397-461.
-  **Holme N.A., 1966.** The bottom fauna of the English Channel. Part II. *Journal of the Marine Biological Association of United Kingdom*, 46: 401-493.
-  **Holtmann S.E., Groenewold A., Schrader K.H.M., Asjes J., Craymeersch J.A., Duineveld G.C.A. & van der Meer J., 1996.** Atlas of the Zoobenthos of the Dutch Continental Shelf. *Ministry of Transport, Public works and Water management, North Sea Directorate, Rijswijk*, 144p.
-  **Hyacinthe J.L. & Kravtchenko J., 1967.** Modèle mathématique de mares littorales. Calcul numérique sur l'exemple de la Manche. *La Houille Blanche*, 6 : 639-650.
-  **Ibanez F., Dauvin J.C. & Etienne M., 1993.** Comparaison des évolutions à long terme (1977-1990) de deux peuplements macrobenthiques de la baie de Morlaix (Manche occidentale) : relation avec les facteurs hydroclimatiques. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 169 : 181-214.
-  **Ihaka R. & Gentleman R., 1996.** R: A language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5: 299-314.
-  **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 p.
-  **Jolly M.T., Jollivet D., Gentil F., Thiébaud E. & Viard F., 2004.** Sharp genetic break between Atlantic and English Channel populations of the polychaete *Pectinaria koreni* along the North coast of France. *Heredity*, 94: 23-32.

-  **Jourde J., 2009.** Suivi des sédiments et des peuplements benthiques dans l'estuaire de la Seine – Rapport de synthèse automne 2007 – printemps 2008. *Rapport d'étude de la Cellule de Suivi du Littoral Normand – Maison de l'Estuaire*, 27p.
-  **Jourde J., Alizier S., Dancie C., Dauvin J.C., Desroy N., Dubut S., Gentil F., Grall J., Hanin C., Lanshere J., Thiébaud E., soumis.** 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*.
-  **Kolasa J. & Zalewski M., 1995.** Notes on the ecotone attributes and functions. *Hydrobiologia*, 303: 1-7.
-  **Kebs C.J., 1972.** Ecology. *Harper & Row, New York*, Introduction.
-  **Laignel B., 1991.** Etude des sédiments superficiels aux abords du Havre. *Mémoire de maîtrise de l'Université de Caen*, 56 p.
-  **Lacombe H., 1951.** Les marées de la Manche. *Bulletin de l'Institut Océanographique*, 47 (1951) : 1-24.
-  **Lacombe H. & Lemièrre, 1953.** Courants de marée dans la Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique. *Service Hydrographique de la Marine*, 550 (427A), Paris, Imprimerie Nationale.
-  **Lagadeuc Y., 1992.** Répartition verticale des larves de *Pectinaria koreni* en baie de Seine Orientale : influence sur le transport et le recrutement. *Oceanologica Acta*, 15(1) :109-118.
-  **Lambert R., 1991.** Recrutement d'espèces benthiques à larves pélagiques en régime mégatidal. Cas de *Pectinaria koreni* (Malmgren), Annélide Polychète. *Thèse de doctorat de l'Université de Rennes I*, 176 p.
-  **Larsonneur C., 1971.** Manche centrale et baie de Seine : géologie du substratum et des dépôts meubles. *Thèse de doctorat d'Etat de l'Université de Caen*. 394 p.
-  **Larsonneur C. & Avoine J., 1981.** Détermination des flux de matières en suspension en Baie de Seine. *Contrat IFREMER 81/6559, Laboratoire de géologie marine, Université de Caen*, 45 p.
-  **Larsonneur C., Bouysse P. & Auffret J.P., 1982.** The superficial sediments of the English Channel and its western approaches. *Sedimentology*, 29: 851-864.
-  **Le Hir P., 1980.** Calcul par modélisation numérique de la structure verticale des courants et application à la baie de Seine. *Thèse de troisième cycle de l'Université de Bretagne occidentale*, 122 p.
-  **Le Hir P., & L'Yavanac J., 1986.** Observations de courant en baie de Seine. *La baie de Seine (GRECO-MANCHE)-Université de Caen, 24-26 avril 1985, Actes de Colloques*, 4 : 25-34.













-  **Le Hir P., Salomon J.C., Le Prevost C., Chabert d'Hieres G., Mauvais, J.L., 1985.** Approche de la circulation résiduelle en baie de Seine. *La baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 63-71.
-  **Le Hir P. & Silva Jacinto R., 2001.** Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau. *Fascicule du Programme Seine-Aval, 2*, IFREMER, 31 p.
-  **Le Hir P., Ficht A., Silva Jacinto R., Lesueur P., Dupont J.P., Lafite R., Brenon I., Thouvenin B. & Cugier P., 2001.** Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine estuary (France). *Estuaries*, 24 (6B): 950-963.
-  **Le Provost C., Fornerino M. & Villaret C., 1986.** Sur l'hydrodynamisme de la baie de Seine. Résultats d'observations et de modélisations. *La Baie de Seine (GRECO-MANCHE)*. IFREMER, Université de Caen, 43-48.
-  **Lesourd S., 2000.** Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal : zoom temporel du siècle à l'heure ; application à l'estuaire de la Seine. *Thèse de doctorat de l'université de Caen*, 280 p.
-  **Lesourd S., Lesueur P., Brun-Cottan J.C., Auffret J.P., Poupinet N. & Laignel B., 2001.** Morphosedimentary evolution of a macrotidal estuary subjected to human impact; the example of the Seine (France). *Estuaries*, 24 (6B) : 940-949.
-  **Lesourd S., Lesueur P., Brun-Cottan J.C., Garnaud S. & Poupinet N., 2003.** Seasonal variations in the characteristics of superficial sediments in a macrotidal estuary (the Seine inlet, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52: 1-14.
-  **Lesueur P., Lesourd S., Auffret J.P., Avoine J., Brun-Cottan J.C. & levoy F., 1997.** Etat des connaissances sur la distribution et l'évolution des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine. *Rapport programme Seine-Aval 1996/FIN-1, Thème Hydrodynamique et transport sédimentaire*, 82-115.
-  **Lesueur P. & Lesourd S., 1999.** Sables, chenaux et vasières. Dynamique des sédiments et évolution morphologique. *Fascicule du Programme Seine-Aval, 3*, IFREMER, 39 p.
-  **Lesueur P., Garnaud S., Lesourd S., Brun-Cottan J.C., Poupinet N. & Tessier B., 2002.** Fonctionnement sédimentaire de vasières intertidales et subtidales de la Seine. *Rapport annuel programme Seine-Aval II, Thématique II : Zones connexes, Atelier II.3 : Fonctionnement des vasières*, Université de Caen, 32 p.
-  **Lu L. & Wu R.S.S., 2000.** An experimental study on recolonisation and succession of marine macrobenthos in defaunated sediment. *Marine Biology*, 136: 291-302.
-  **Luczak C. & Dewarumez J.M.D., 1992.** Note on the identification of *Ensis directus* (Conrad, 1843). *Cahiers de biologie marine*, 33: 515-518.

-  **Luczak C., Janquin M.A., & Kupka A., 1997.** Simple standard procedure for the routine determination of organic matter in the marine sediment. *Hydrobiologia*, 345: 87-94.
-  **Lumby J.R., 1935.** Salinity and temperature of the English Channel. *Atlas of charts. Fishery Investigations. Series II*, 14: 1-50.
-  **MacArthur R.H., 1972.** Geographical Ecology – Patterns in the distribution of Species. *Princeton University Press, New Jersey*, 261 p.
-  **Macdonald P. & Green P.E.J., 1988.** User's Guide to Program MIX: An Interactive Program for Fitting Mixtures of Distributions. *ICHTHUS DATA SYSTEMS*.
-  **Macdonald P. & Du J., 2011.** Finite Mixture Distribution Models. *R package version 0.5-3*, <http://www.r-project.org>, <http://www.math.mcmaster.ca/peter/mix/mix.html>, 34 p.
-  **Meibner K. & Darr A., 2009.** Distribution of *Magelona* species (Polychaeta: Magelonidae) in the German Bight (North Sea): a modelling approach. *Zoosymposia*, 2: 567-586.
-  **Naylor E., 1957.** Immigrant marine animals in Great Britain. *New Scientist*, 2: 21-53.
-  **Olivier F., Desroy N. & Retière C., 1996a.** Habitat selection adult-recruit interactions in *Pectinarai koreni* (Malmgren) (Annelida: Polychaeta) post-larval populations: results of flume experiments. *Journal of Sea Research*, 36: 217-226.
-  **Olivier F., Vallet C., Dauvin J.C. & Retière C., 1996b.** Drifting in post-larvae and juveniles in an *Abra alba* (Wood) community of the eastern part of the Bay of Seine (English Channel). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1999: 89-109.
-  **Pingree R.D. & Maddock L., 1977.** Tidal residuals in the English Channel. *Journal of the Marine Biological Association of United Kingdom*, 57: 339-354.
-  **Pruvot C., Empis A. & Dhanaut-Courtois N., 2000.** Présence du mollusque bivalve *Corbula gibba* (Olivi, 1972) dans les sédiments meubles du port Est de Dunkerque (Mer du Nord). *Bulletin de la Société zoologique de France*, 125 (1): 75-82.
-  **R Development Core Team 2005.** R: A language and environment for statistical computing. *R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria*, ISBN 3-900051-07-0, URL: <http://R-project.org>.
-  **Rabaut M., Guilini K., Van Hoey G., Vincx M. & Degraer S., 2007.** A bio-engineered soft-bottom environment: The impact of *Lanice conchilega* on the benthic species-specific densities and community structure. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 75: 525-536.
-  **Rees E.I.S., 2001.** Habitat specialisation by *Thia scutellata* (Decapoda: Brachyura) off Wales. *Journal of Marine Biology Association of United Kindom*, 81:697-698.
-  **Retière C., 1979.** Contribution à la connaissance des peuplements benthiques du Golfe normano-breton. **Thèse d'Etat de l'Université de Rennes**, 421 p.



-  **Reynaud J.Y., Tessier, B., Auffret J.P., Berné S., De Batist M., Marsset T. & Walker P., 2003.** The offshore Quaternary sediment bodies of the English Channel and its Western approaches. *Journal of Quaternary Science*, 18: 361-371.
-  **Robert M., 1999.** Caractérisation et déterminisme du développement d'une population de l'annélide tubicole *Lanice conchilega* (Pallas, 1766) (Polychète Terebellide) associé à la conchyliculture en Baie des Veys (Baie de Seine Occidentale), *Thèse de Doctorat Environnement Marin du Muséum National d'Histoire Naturelle*, 181 p.
-  **Robert M. & Dauvin J.C., 2000.** Renewal and accumulation of a *Lanice conchilega* (Pallas) population in the bay des Veys, western Bay of Seine. *Oceanologica Acta*, 23: 529-546.
-  **Rouse G.W., Pleijel F., 2001.** Polychaetes. *New York Oxford University Press*, 354 p.
-  **Ruellet T. & Dauvin J.-C., 2007.** Base de Données MABES – Macrobenthos de la Baie et de l'Estuaire de Seine – version 2 : Aide. *GIP Seine-Aval, Rouen. Consultable sur le site <http://fip-sa.crihan.fr/webGIPSA/>*.
-  **Sager G.V., 1963.** Atlas der Elemente des Tidenhubs und der Gezeitenströme für die Nordsee, den Kanal und die Irische See. *Akad. Wiss. Berlin. Institut für Meereskunde, Rostock*, 45 p.
-  **Salomon J.C., 1985.** Courantologie calculée en baie de Seine. *La baie de Seine (GRECO-MANCHE)-Université de Caen, 24-26 avril 1985, Actes de Colloques*, 4.
-  **Salomon J.C. & Breton, 1991.** Courants résiduels de marée dans la Manche. *Oceanologica Acta*, sp11 : 47-53.
-  **Sanvicente-Añorve L., 1995.** Détermination des structures benthiques spatiales en Manche Orientale au moyen de méthodes d'analyse multivariable et de techniques d'interpolation. *Thèse de doctorat de l'Université de Lille I*, 169 p.
-  **Schlacher T.A. & Wooldridge T.H., 1996b.** How sieve mesh size affects sample estimates of estuarine benthic macrofauna. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 201: 159-171.
-  **Souissi S., Ibanez F., Ben Hamadou R., Boucher J., Cathelineau A.C., Blanchard F. & poulard J.C., 2001.** A new multivariate mapping method for studying species assemblages and their habitats: example using bottom trawl surveys in the Bay of Biscay (France). *Sarsia*, 86: 527-542.
-  **Souplet A., Glaçon R., Dewarumez J.M. & Smigielski F., 1980.** Distribution des peuplements benthiques littoraux en Mer du Nord, du Cap Blanc-Nez à la frontière de Belgique. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de paris*, 290 : 627-630.
-  **Tebble N., 1976.** British Bivalve Seashells. *A Handbook for Identification, 2<sup>nd</sup> ed. Edinburgh: British Museum (Natural History), Her Majesty's Stationary Office.*



-  **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 de l'université Paris VI*, 152 p.
-  **Thiébaud E., 1996.** Distribution of *Pectinaria koreni* larvae (Annelida: Polychaeta) in relation to the Seine river plume front (eastern English Channel). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 43: 383-397.
-  **Thiébaud E., Dauvin J.C. & Lagadeuc Y., 1992.** Transport of *Owenia fusiformis* larvae (Annelida polychaeta) in the Bay of Seine I: Vertical distribution in relation to water column stratification and ontogenic vertical migration. *Marine Ecology Progress series*, 80: 29-39.
-  **Thiébaud E., Dauvin J.C. & Lagadeuc Y., 1994.** Horizontal distribution and retention of *Owenia fusiformis* larvae (Annelida: polychaeta) in the Bay of Seine. *Journal of Marine Biology Association of United Kingdom*, 74: 129-142.
-  **Thiébaud E., Dauvin J.C. & Wang Z., 1995.** Are polychaete larvae passive in the water column? Examples from a macrotidal estuary (Baie de Seine, English Channel). *Proceedings of the 30<sup>th</sup> European Marine Biological Symposium, Southampton*.
-  **Thiébaud E., Dauvin J.C. & Wang Z., 1996.** Tidal transport of *Pectinaria koreni* postlarvae (Annelida: Polychaeta) in the Bay of Seine (eastern English Channel). *Marine Ecology Progress Series*, 138: 63-70.
-  **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.
-  **Thouvenin B., Billen G., Even S., Fischer J.C., Gonzalez J.L., Le Hir P., Loizeau V., Mouchel J.M., Olivier C., Jacinto R.S., Ouddane B., 1999.** Les modèles : outils de connaissance et de gestion. *Fascicule du Programme Seine-Aval*, 16, IFREMER, 31 p.
-  **Van Hoey G., Degraer S., Vincx M., 2004.** Macrobenthic community structure of soft-bottom sediments at the Belgian Continental Shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59: 599-613.
-  **Vaslet D., Larssonneur C. & Auffret J.P., 1978.** Les sédiments superficiels de la Manche au 1/500 000<sup>e</sup> et notice explicative. *BRGM, Orléans*, 17 p.
-  **Willis K.J., Cook E.J., Lozano-Fernandez M. & Takeuchi I., 2004.** First record of the alien caprellid amphipod, *Caprella mutica*. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 84: 1027-1028.
-  **Wolff W.J. & Sandee A.J.J., 1971.** Distribution and ecology of the Decapoda Reptantia of the estuarine area of the rivers Rhine, Meuse and Scheldt. *Netherlands Journal of Sea Research*, 5: 197-226.



**Ysebaert T. & Herman P.M.J., 2002.** Spatial and temporal variation in benthic macrofauna and relationships with environmental variables in an estuarine, intertidal soft-sediment environment. *Marine Ecology Progress Series*, 244: 105-124.



**Ysebaert T., Meire P., Herman P.M.J. & Verbeek H., 2002.** Macrobenthic species response surface along estuarine gradients: prediction by logistic regression. *Marine Ecology Progress Series*, 225: 79-95.

## ANNEXES



### Annexe 1

*Liste des espèces rencontrées lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009 sur la base de 48 stations communes, chacune comportant 4 réplicats. Les espèces marquées d'un astérisque correspondent aux espèces récoltées uniquement en 2008 et les espèces marquées par deux astérisques correspondent aux espèces récoltées uniquement en 2009. Les autres sont les espèces communes aux deux années échantillonnées. A la fin de cette liste figure un tableau présentant les abréviations utilisées pour certaines espèces afin de rendre plus lisible certains résultats d'analyses.*



### Annexe 2

*Liste des espèces rencontrées lors des campagnes 1988, 1991, 1996, 2001, 2006 du suivi PECTOW. Les noms des espèces de la base de données initiale ont parfois été ramenés au genre ou à la famille pour pallier à d'éventuels biais de détermination. A la fin de cette liste figure un tableau présentant les abréviations utilisées pour certaines espèces afin de rendre plus lisible certains résultats d'analyses.*



### Annexe 3

*Courbes allométriques représentant les mesures de biomasses (g de PSLC) par classes de taille des individus chez Abra alba, Ensis directus, Ensis magnus, Pectinaria koreni, Owenia fusiformis, récoltés lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009. L'axe des abscisses représente la taille des individus en mm et l'axe des ordonnées représente la biomasse estimée en g par la méthode du PSLC.*



### Annexe 4

*Histogrammes et courbes cumulées des pourcentages pondéraux des différentes fractions granulométriques issues des analyses de prélèvement sédimentaires réalisés lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009 et photographies. Les courbes cumulées marquées de carrés correspondent aux prélèvements réalisés à la benne Shipeck, les histogrammes et les courbes cumulées marquées de ronds pleins correspondent aux prélèvements réalisés à la benne Van Veen.*



### Annexe 5

*Planches des photographies des prélèvements sédimentaires réalisés à la benne Van Veen et à la benne Shipeck lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009 illustrant le principe du codage réalisé pour l'étude de la texture sédimentaire.*



### Annexe 6

*Histogrammes de fréquence des classes de tailles et cohortes modélisées pour Abra alba, Pectinaria koreni, Owenia fusiformis et Phaxas pellucidus à partir des données de biométries sur les individus récoltés lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009. Ces graphes sont extraits du rapport de stage de M1 de Thomas Anquez (2011).*



### Annexe 7

*Cartes de distribution spatiale des individus de moins de un an et des individus de plus de un an chez Abra alba, Pectinaria koreni, Owenia fusiformis et Phaxas pellucidus récoltés lors des campagnes*

**COLMATAGE 2008 et 2009.** Ces graphes sont extraits du rapport de stage de M1 de Thomas Anquez (2011).



## Annexe 8

**Cartes de distribution spatiale des cinq classes granulométriques (vases ( $< 63 \mu\text{m}$ ), sables fins ( $[50-200] \mu\text{m}$ ), sables moyens ( $[50-200] \mu\text{m}$ ), sables grossiers ( $[50-200] \mu\text{m}$ ), graviers ( $> 2000 \mu\text{m}$ )) prises en comptes lors des campagnes du suivi PECTOW, pour les années 1988, 1991, 1996, 2001 et 2006 et sur la base de la grille d'échantillonnage commune à toutes ces années.**



## Annexe 9

**Tableau A : Indices de marginalité (OMI : Outlying Mean Index), de tolérance (Tol) et de tolérance résiduelle (RTol), calculés à partir des résultats de l'analyse OMI réalisée sur les données groupées 2008-2009 des campagnes COLMATAGE. Un test de Monte Carlo a été utilisé pour tester la significativité de la marginalité des espèces prises en compte dans l'analyse, les résultats sont dans la colonne (p.value).**

**Tableau B : Indices de marginalité (OMI : Outlying Mean Index), de tolérance (Tol) et de tolérance résiduelle (RTol), calculés à partir des résultats de l'analyse OMI réalisée sur les données groupées 1988-1991-1996-2001-2006 des campagnes PECTOW. Un test de Monte Carlo a été utilisé pour tester la significativité de la marginalité des espèces prises en compte dans l'analyse, les résultats sont dans la colonne (p.value).**



## Annexe 10

**Cartes de distribution spatiale des abondances (ind. /  $0,4 \text{ m}^2$ ) de quelques espèces rencontrées lors des campagnes d'échantillonnage COLMATAGE en septembre 2008 et 2009, sur la base de la grille d'échantillonnage commune aux deux années. Les cartes sont triées par ordre alphabétique du nom des espèces.**



## Annexe 11

**11/A: Cartes de distribution spatiale des valeurs de richesse spécifique (esp. /  $1 \text{ m}^2$ ) rencontrées lors des campagnes d'échantillonnage du suivi PECTOW en mars 1988, 1991, 1996, 2001 et 2006, sur la base de la grille d'échantillonnage commune à toutes ces années.**

**11/B: Cartes de distribution spatiale des valeurs d'abondance totale (ind. /  $1 \text{ m}^2$ ) rencontrées lors des campagnes d'échantillonnage du suivi PECTOW en mars 1988, 1991, 1996, 2001 et 2006, sur la base de la grille d'échantillonnage commune à toutes ces années.**

**11/C: Cartes de distribution spatiale des abondances (ind. /  $1 \text{ m}^2$ ) de quelques espèces rencontrées lors des campagnes d'échantillonnage du suivi PECTOW en mars 1988, 1991, 1996, 2001 et 2006, sur la base de la grille d'échantillonnage commune à toutes ces années. Les cartes sont triées par ordre alphabétique du nom des espèces.**



## Annexe 12

**Publications parues ou soumises au cours de ces trois années de thèse.**

***Liste des espèces rencontrées lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009 sur la base de 48 stations communes, chacune comportant 4 réplicats.***

*Les espèces marquées d'un astérisque correspondent aux espèces récoltées uniquement en 2008 et les espèces marquées par deux astérisques correspondent aux espèces récoltées uniquement en 2009. Les autres sont les espèces communes aux deux années échantillonnées.*

*A la fin de cette liste figure un tableau présentant les abréviations utilisées pour certaines espèces afin de rendre plus lisible certains résultats d'analyses.*

<u>TAXONS</u>	<u>DESCRIPTEURS</u>
<u>Annélides polychètes</u>	
<i>Ampharete baltica</i>	Eliason, 1955
<i>Amphicteis gunneri</i>	M. Sars, 1835
<i>Aonides oxycephala</i>	Sars, 1862
<i>Aonides paucibranchiata</i>	Southern, 1914
<i>Aphelochaeta marioni</i>	de Saint Joseph, 1894
<i>Aphrodita aculeata</i>	Linnaeus, 1758
<i>Aricidea suecica</i>	Eliason, 1920
<i>Capitella capitata</i>	Fabricius, 1780
<i>Capitomastus minima</i>	Langerhans, 1881
<i>Caulleriella alata</i>	Southern, 1914
<i>Chaetozone christiei</i>	Malmgren, 1867
<i>Chaetozone gibber</i>	Woodham & Chambers, 1994
<i>Chaetozone setosa**</i>	Woodham & Chambers, 1994
<i>Cirratulidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Eteone flava*</i>	Fabricius, 1780
<i>Eteone foliosa</i>	Quatrefages, 1866
<i>Eteone longa</i>	Fabricius, 1780
<i>Eumida bahusiensis</i>	Bergstrom, 1914
<i>Eunereis longissima</i>	Johnston, 1840
<i>Exogone (Parexogone) hebes**</i>	Webster & Benedict, 1884
<i>Glycera convoluta</i>	Schmarda, 1861
<i>Glycera gigantea*</i>	Quatrefages, 1866
<i>Glycinde nordmanni</i>	Malmgren, 1866
<i>Harmothoe</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Jasmineir aelegans</i>	Saint-Joseph, 1894
<i>Lagis koreni</i>	Malmgren, 1866
<i>Lanice conchilega</i>	Pallas, 1766
<i>Lumbrineris</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Magelona filiformis</i>	Wilson, 1959
<i>Magelona johnstoni</i>	Fiege, Licher & Mackie, 2000
<i>Maldanidae</i> <sup>(Fam)*</sup>	
<i>Malmgreniella</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Marphysa bellii</i>	Audouin & Milne-Edwards, 1833
<i>Mediomastus fragilis</i>	Rasmussen, 1973
<i>Melinna palmata</i>	Grube, 1870
<i>Mysta picta</i>	Quatrefages, 1865



<i>Neoamphitrite edwardsi</i> **	Quatrefages
<i>Nephtys assimilis</i>	Örsted, 1843
<i>Nephtys caeca</i> *	Fabricius, 1780
<i>Nephtys cirrosa</i>	Ehlers, 1868
<i>Nephtys hombergii</i>	Savigny in Lamarck, 1818
<i>Nereimyra punctata</i>	Müller, 1788
<i>Notomastus latericeus</i>	Sars, 1851
<i>Ophiodromus flexuosus</i> *	Delle Chiaje, 1827
<i>Owenia fusiformis</i>	Delle Chiaje, 1844
<i>Paranaitis kosteriensis</i>	Malmgren, 1867
<i>Pherusa plumosa</i> *	O.F. Müller, 1776
<i>Pholoe</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Phyllodoce laminosa</i>	Savigny in Lamarck, 1818
<i>Phyllodoce lineata</i>	Claparède, 1870
<i>Phyllodoce longipes</i>	Kinberg, 1866
<i>Phyllodoce maculata</i>	Linné, 1767
<i>Phyllodoce mucosa</i>	Örsted, 1843
<i>Phyllodoce rosea</i>	McIntosh, 1877
<i>Pista cristata</i>	Müller, 1776
<i>Pista elongata</i> *	Moore, 1909
<i>Poecilochaetus serpens</i>	Allen, 1904
<i>Polycirrus</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Polydora</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Protodorvillea kefersteini</i>	McIntosh, 1869
<i>Pterocirrus macroceros</i> *	Grube, 1860
<i>Sabella pavonina</i>	Savigny, 1822
<i>Scalibregma celticum</i>	Mackie, 1991
<i>Schistomeringos rudolphii</i>	Delle Chiaje, 1828
<i>Scoloplos (Scoloplos) armiger</i>	Müller, 1776
	Audouin & Milne Edwards in Cuvier, 1830
<i>Sigalion mathildae</i>	Bobretzky, 1870
<i>Spio decoratus</i>	Mesnil, 1896
<i>Spio martinensis</i>	
<i>Spionidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Spiophanes bombyx</i>	Claparède, 1870
<i>Spirobranchus</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Sthenelais boa</i>	Johnston, 1833
<i>Syllidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Terebellides stroemii</i>	Sars, 1835

---

**Arthropodes malacostracés amphipodes**


---

<i>Abludomelita obtusata</i>	Montagu, 1813
<i>Acidostoma obesum</i>	Bate & Westwood, 1861
<i>Allomelita pellucida</i> *	Sars, 1882
<i>Ampelisca brevicornis</i>	Costa, 1853
<i>Ampelisca diadema</i>	Costa, 1853
<i>Ampelisca tenuicornis</i>	Liljeborg, 1855
<i>Ampelisca typica</i>	Bate, 1856
<i>Amphilocheus neapolitanus</i> *	Della Valle, 1893
<i>Aora typica</i> **	Kroyer, 1845
<i>Apherusa bispinosa</i> *	Bate, 1857
<i>Atylus vedlomensis</i>	Bate & Westwood, 1862
<i>Bathyporeia elegans</i>	Watkin, 1938
<i>Bathyporeia tenuipes</i>	Meinert, 1877
<i>Cheirocratus</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Corophium</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Erichthonius punctatus</i>	Bate, 1857
<i>Gammaridae</i> <sup>(Fam)</sup> **	
<i>Haustorius arenarius</i>	Slabber, 1769
<i>Leucothoe incisa</i>	Robertson, 1892
<i>Leucothoe lilljeborgi</i>	Boeck, 1861
<i>Megaluropus agilis</i>	Hoeck, 1889
<i>Megamphopus cornutus</i> **	Norman, 1869
<i>Melita palmata</i>	Montagu, 1804
<i>Nototropis falcatus</i>	Metzger, 1871
<i>Orchomenella nana</i>	Kroyer, 1846
<i>Pariambus typicus</i>	Krøyer, 1884
<i>Perioculodes longimanus</i>	Bate & Westwood, 1868
<i>Photis longicaudata</i>	Bate & Westwood, 1862
<i>Phtisica marina</i>	Slabber, 1769
<i>Pontocrates arenarius</i>	Bate, 1858
<i>Stenothoe marina</i> **	Bate, 1856
<i>Urothoe elegans</i>	Bate, 1857
<i>Urothoe poseidonis</i>	Reibish, 1905

---

**Arthropodes malacostracés cumacés**


---

<i>Bodotria arenosa</i>	Goodsir, 1843
<i>Bodotria scorpioides</i>	Sars, 1878
<i>Diastylis bradyi</i>	Norman, 1879
<i>Diastylis laevis</i>	Norman, 1869
<i>Eudorella truncatula</i>	Bate, 1856

<i>Iphinoe trispinosa</i>	Goodsir, 1843
<i>Pseudocuma (Pseudocuma) simile</i>	G.O. Sars, 1900

---

### **Arthropodes malacostracés décapodes**

---

<i>Anapagurus hyndmanni</i>	Bell, 1845
<i>Atelecyclus rotundatus</i> *	Olivi, 1792
<i>Athanas nitescens</i> *	Leach, 1813
<i>Carcinus maenas</i>	Linnaeus, 1758
<i>Corystes cassivelaunus</i>	Pennant, 1777
<i>Crangon crangon</i>	Linnaeus, 1758
<i>Asthenognathus atlanticus</i> **	Monod, 1932
<i>Ebalia tumefacta</i>	Montagu, 1808
<i>Eualus</i> <sup>(Genr)*</sup>	
<i>Galathea intermedia</i>	Liljeborg, 1851
<i>Hippolyte</i> <sup>(Genr)**</sup>	
<i>Liocarcinus</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Liocarcinus depurator</i>	Linnaeus, 1758
<i>Liocarcinus holsatus</i>	Fabricius, 1798
<i>Liocarcinus marmoreus</i>	Leach, 1814
<i>Macropodia linarezi</i>	Forest & Zariquiey Alvarez, 1964
<i>Paguridae</i> <sup>(Fam)*</sup>	
<i>Pagurus bernhardus</i>	Linnaeus, 1758
<i>Pandalina brevirostris</i> *	Rathke, 1843
<i>Philocheras bispinosus</i>	Hailstone, 1835
<i>Pinnotheres pisum</i>	Linnaeus, 1767
<i>Pisidia longicornis</i>	Linnaeus, 1767
<i>Processa</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Thia scutellata</i>	Fabricius, 1793
<i>Upogebia deltaura</i>	Leach, 1815

---

### **Arthropodes malacostracés isopodes**

---

<i>Gnathiidae</i> <sup>(Fam)**</sup>	
<i>Idotea linearis</i> *	Linnaeus, 1766

---

### **Arthropodes malacostracés mysidacés**

---

<i>Anchialina agilis</i>	G.O. Sars, 1877
<i>Gastrosaccus sanctus</i>	van Beneden, 1861
<i>Gastrosaccus spinifer</i>	Goës, 1864
<i>Haplostylus normani</i>	G.O. Sars, 1877
<i>Mesopodopsis slabberi</i>	van Beneden, 1861

<i>Schistomysis kervillei</i>	G.O. Sars, 1885
<i>Schistomysis ornata</i> *	G.O. Sars, 1864
<i>Siriella jaltensis</i> *	Czerniavsky, 1868

---

### Arthropodes pycnogonidés

---

<i>Achelia echinata</i>	Hodge, 1864
<i>Anoplodactylus petiolatus</i>	Kroyer, 1844
<i>Nymphon brevirostre</i>	Hodge, 1864

---

### Echinodermes

---

<i>Acrocorda brachiata</i>	Montagu, 1804
<i>Amphipholis squamata</i>	Delle Chiaje, 1828
<i>Asterias rubens</i>	Linnaeus, 1758
<i>Echinocardium cordatum</i>	Pennant, 1777
<i>Ophiothrix fragilis</i> *	Abildgaard, in O.F. Müller, 1789
<i>Ophiura albida</i>	Forbes, 1839
<i>Ophiura ophiura</i>	Linnaeus, 1758
<i>Psammechinus miliaris</i>	P.L.S. Müller, 1771
<i>Thyone fusus</i>	O.F. Müller, 1776

---

### Mollusques bivalves

---

<i>Abra alba</i>	W. Wood, 1802
<i>Acanthocardia echinata</i>	Linnaeus, 1758
<i>Cerastoderma edule</i>	Linnaeus, 1758
<i>Corbula gibba</i>	Olivi, 1792
<i>Donax vittatus</i>	da Costa, 1778
<i>Ensis directus</i>	Conrad, 1843
<i>Ensis magnus</i>	Jeffreys, 1865
<i>Kurtiella bidentata</i>	Montagu, 1803
<i>Lutraria angustior</i>	Philippi, 1844
<i>Macoma balthica</i>	Linnaeus, 1758
<i>Mactra stultorum</i>	Linnaeus, 1758
<i>Modiolus barbatus</i> *	Linnaeus, 1758
<i>Mya</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Mytilus edulis</i>	Linnaeus, 1758
<i>Nucula nitidosa</i>	Winckworth, 1930
<i>Pandora albida</i>	Röding, 1798
<i>Paphia rhomboides</i> *	Pennant, 1777
<i>Parvicardium scabrum</i>	Philippi, 1844
<i>Petricola pholadiformis</i>	Lamarck, 1818

<i>Phaxas pellucidus</i>	Pennant, 1777
<i>Solen marginatus</i> *	Pulteney, 1799
<i>Spisula subtruncata</i>	da Costa, 1778
<i>Tellimya ferruginosa</i>	Montagu, 1808
<i>Tellina donacina</i> *	Linnaeus, 1758
<i>Tellina fabula</i>	Gmelin, 1791
<i>Thracia papyracea</i>	Poli, 1791
<i>Tubulanus</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Venerupis senegalensis</i>	Montagu, 1803

---

### **Mollusques gastropodes**

---

<i>Acteon tornatilis</i>	Linnaeus, 1758
<i>Aeolidia papillosa</i> *	Linnaeus, 1761
<i>Crepidula fornicata</i>	Linnaeus, 1758
<i>Euspira pulchella</i>	Risso, 1826
<i>Melanella alba</i> *	da Costa, 1778
<i>Nassarius pygmaeus</i>	Lamarck, 1822
<i>Nassarius reticulatus</i>	Linnaeus, 1758
<i>Onchidoris</i> <sup>(Genr)*</sup>	

---

### **Némertes**

---

<i>Tubulanus polymorphus</i>	Renier, 1804
<i>Nemertina</i> <sup>(Phy)</sup>	

---

### **Autres**

---

<i>Antalis vulgaris</i>	da Costa, 1778
<i>Phascolion (Phascolion) strombus</i> *	Montagu, 1804
<i>Sepia atlantica</i> *	Orbigny, 1841
<i>Vanthompsonia cristata</i> **	

Tableau des abréviations (Ordre alphabétique des abréviations) :

<i>Abra alba</i>	Abr-a	<i>Liocarcinus</i> <sup>(Genr)</sup>	Gen-Li	<i>Nucula nitidosa</i>	Nuc-n
<i>Ampelisca brevicornis</i>	Ampe-b	<i>Lumbrineris</i> <sup>(Genr)</sup>	Gen-Lu	<i>Owenia fusiformis</i>	Owe-f
<i>Ampelisca tenuicornis</i>	Ampe-te	<i>Processa</i> <sup>(Genr)</sup>	Gen-Pr	<i>Pariambus typicus</i>	Par-t
<i>Ampharete baltica</i>	Amph-b	<i>Glycinde nordmanni</i>	Gly-n	<i>Periocolodes longimanus</i>	Per-l
<i>Antalis vulgaris</i>	Ant-v	<i>Lagis koreni</i>	Lag-k	<i>Petricola pholadiformis</i>	Pet-p
<i>Bathyporeia elegans</i>	Bat-e	<i>Lutraria angustior</i>	Lut-a	<i>Phyllococe mucosa</i>	Phy-mu
<i>Bathyporeia tenuipes</i>	Bat-t	<i>Magelona filiformis</i>	Mag-f	<i>Phyllococe rosea</i>	Phy-r
<i>Caulleriella alata</i>	Cau-a	<i>Magelona johnstoni</i>	Mag-j	<i>Poecilochaetus serpens</i>	Poe-s
<i>Corbula gibba</i>	Cor-g	<i>Mediomastus fragilis</i>	Med-f	<i>Sigalion mathildae</i>	Sig-m
<i>Echinocardium cordatum</i>	Ech-c	<i>Megaluropus agilis</i>	Meg-a	<i>Sthenelais boa</i>	Sth-b
<i>Ensis directus</i>	Ens-d	<i>Melinna palmata</i>	Meln-p	<i>Thia scutellata</i>	Thi-s
<i>Ensis magnus</i>	Ens-m	<i>Melita palmata</i>	Melt-p	<i>Thyone fusus</i>	Thy-f
<i>Erichthonius punctatus</i>	Eri-p	<i>Nephtys assimilis</i>	Nep-a	<i>Venerupis senegalensis</i>	Ven-s
<i>Eumida bahusiensis</i>	Eum-b	<i>Nephtys cirrosa</i>	Nep-c		
<i>Eunereis longissima</i>	Eun-l	<i>Notomastus latericeus</i>	Not-l		



***Liste des espèces rencontrées lors des campagnes 1988, 1991, 1996, 2001, 2006 du suivi PECTOW.***

*Les noms des espèces de la base de données initiale ont parfois été ramenés au genre ou à la famille pour pallier à d'éventuels biais de détermination.*

*A la fin de cette liste figure un tableau présentant les abréviations utilisées pour certaines espèces afin de rendre plus lisible certains résultats d'analyses.*

<u>TAXONS</u>	<u>DESCRIPTEURS</u>
<u>Annélides polychètes</u>	
<i>Ampharete baltica</i>	Eliason, 1955
<i>Amphitritides gracilis</i>	Grube, 1860
<i>Aonides oxycephala</i>	Sars, 1862
<i>Aphelochaeta marioni</i>	de Saint Joseph, 1894
<i>Aphrodita</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Arenicola marina</i>	Linnaeus, 1758
<i>Capitella</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Caulleriella</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Chaetopterus variopedatus</i>	Cuvier, 1827
<i>Chaetozone</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Cirriformia tentaculata</i>	Montagu, 1808
<i>Eteone longa</i>	Fabricius, 1780
<i>Eumida</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Eunereis longissima</i>	Johnston, 1840
<i>Eupolymnia nebulosa</i>	Montagu, 1818
<i>Gattyana cirrhosa</i>	Pallas, 1766
<i>Glycera</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Glycinde nordmanni</i>	Malmgren, 1866
<i>Hesionidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Lagis koreni</i>	Malmgren, 1866
<i>Lanice conchilega</i>	Pallas, 1766
<i>Lumbrineris</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Lygdamis muratus</i>	Allen, 1904
<i>Magelona</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Maldanidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Malmgreniella</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Marphysa bellii</i>	Audouin & Milne-Edwards, 1833
<i>Mediomastus fragilis</i>	Rasmussen, 1973
<i>Melinna palmata</i>	Grube, 1870
<i>Myriochele</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Mysta picta</i>	Quatrefages, 1866
<i>Neoamphitrite</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Nephtys caeca</i>	Fabricius, 1780
<i>Nephtys cirrosa</i>	Ehlers, 1868
<i>Nephtys hombergii</i>	Savigny in Lamarck, 1818
<i>Nephtys longosetosa</i>	Örsted, 1842

<i>Nereis</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Notomastus latericeus</i>	Sars, 1851
<i>Ophelia borealis</i>	Quatrefages, 1866
<i>Orbinia (Orbinia) sertulata</i>	Savigny, 1820
<i>Owenia fusiformis</i>	Delle Chiaje, 1844
<i>Paranaitis kosteriensis</i>	Malmgren, 1867
<i>Pherusa plumosa</i>	Müller, 1776
<i>Pholoe</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Phyllodoce</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Pista cristata</i>	Müller, 1776
<i>Poecilochaetus serpens</i>	Allen, 1904
<i>Polychaeta</i> <sup>(Class)</sup>	
<i>Polycirrus</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Polydora</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Protodorvillea kefersteini</i>	McIntosh, 1869
<i>Sabellidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Scalibregma celticum</i>	Mackie, 1991
<i>Schistomeringos neglecta</i>	Fauvel, 1923
<i>Schistomeringos rudolphii</i>	Delle Chiaje, 1828
<i>Scolecopsis</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Scoloplos (Scoloplos) armiger</i>	Müller, 1776
<i>Sigalion mathildae</i>	Audouin & Milne Edwards in Cuvier, 1830
<i>Spio</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Spiophanes bombyx</i>	Claparède, 1870
<i>Sthenelais boa</i>	Johnston, 1833
<i>Syllidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Terebellides stroemii</i>	Sars, 1835
<i>Thelepus setosus</i>	Quatrefages, 1866
<i>Websterinereis glauca</i>	Claparède, 1870

---

### **Arthropodes malacostracés amphipodes**

---

<i>Ampelisca brevicornis</i>	Costa, 1853
<i>Ampelisca spinipes</i>	Boeck, 1861
<i>Ampelisca tenuicornis</i>	Liljeborg, 1855
<i>Atylidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Bathyporeia</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Caprellidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Cheirocratus</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Corophium</i> <sup>(Genr)</sup>	

<i>Dexaminidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Erichthonius punctatus</i>	Bate, 1857
<i>Gammarus</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Ischyrocerus anguipes</i>	Krøyer, 1838
<i>Leucothoe incisa</i>	Robertson, 1892
<i>Lysianassidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Melitidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Periiculodes longimanus</i>	Bate & Westwood, 1868
<i>Photis longicaudata</i>	Bate & Westwood, 1862
<i>Urothoe elegans</i>	Bate, 1857
<i>Urothoe poseidonis</i>	Reibish, 1905
<hr/>	
<b><u>Arthropodes malacostracés cumacés</u></b>	
<hr/>	
<i>Diastylis</i> <sup>(Genr)</sup>	
<hr/>	
<b><u>Arthropodes malacostracés décapodes</u></b>	
<hr/>	
<i>Callianassidae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Carcinus maenas</i>	Linnaeus, 1758
<i>Corystes cassivelaunus</i>	Pennant, 1777
<i>Crangon crangon</i>	Linnaeus, 1758
<i>Diogenes pugilator</i>	Roux, 1829
<i>Ebalia</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Eualus</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Eurynome</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Liocarcinus depurator</i>	Linnaeus, 1758
<i>Liocarcinus pusillus</i>	Leach, 1816
<i>Macropodia</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Nepinnotheres pinnotheres</i>	Linnaeus, 1758
<i>Paguridae</i> <sup>(Fam)</sup>	
<i>Pinnotheres pisum</i>	Linnaeus, 1767
<i>Pisidia longicornis</i>	Linnaeus, 1767
<i>Processa</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Thia scutellata</i>	Fabricius, 1793
<i>Upogebia deltaura</i>	Leach, 1815
<hr/>	
<b><u>Arthropodes malacostracés isopodes</u></b>	
<hr/>	
<i>GenrIdotea</i>	

---

**Arthropodes malacostracés mysidacés**


---

<i>Gastrosaccus sanctus</i>	van Beneden, 1861
<i>Gastrosaccus spinifer</i>	Goës, 1864
<i>Schistomysis kervillei</i>	G.O. Sars, 1885

---

**Arthropodes pycnogonidés**


---

*Pycnogonida* <sup>(Class)</sup>

---

**Echinodermes**


---

<i>Acrocrida brachiata</i>	Montagu, 1804
<i>Amphipholis squamata</i>	Delle Chiaje, 1828
<i>Asterias rubens</i>	Linnaeus, 1758
<i>Echinocardium cordatum</i>	Pennant, 1777
<i>Holothuroidea</i> <sup>(Class)</sup>	
<i>Ophiura albida</i>	Forbes, 1839
<i>Ophiura ophiura</i>	Linnaeus, 1758
<i>Psammechinus miliaris</i>	P.L.S. Müller, 1771
<i>Thyone fusus</i>	O.F. Müller, 1776

---

**Mollusques bivalves**


---

<i>Abra alba</i>	W. Wood, 1802
<i>Acanthocardia</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Cerastoderma edule</i>	Linnaeus, 1758
<i>Corbula gibba</i>	Olivi, 1792
<i>Donax</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Ensis directus</i>	Conrad, 1843
<i>Ensis ensis</i>	Linnaeus, 1758
<i>Ensis magnus</i>	Jeffreys, 1865
<i>Ensis siliqua</i>	Linnaeus, 1758
<i>Kurtiella bidentata</i>	Montagu, 1803
<i>Lajonkairia lajonkairii</i>	Payraudeau, 1826
<i>Lepton squamosum</i>	Montagu, 1803
<i>Lutraria</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Macoma balthica</i>	Linnaeus, 1758
<i>Mactra stultorum</i>	Linnaeus, 1758
<i>Mya</i> <sup>(Genr)</sup>	
<i>Mytilus edulis</i>	Linnaeus, 1758
<i>Nucula nitidosa</i>	Winckworth, 1930
<i>Pandoraina equivalvis</i>	Linnaeus, 1758
<i>Phaxas pellucidus</i>	Pennant, 1777

<i>Solen marginatus</i>	Pulteney, 1799
<i>Spisula solida</i>	Linnaeus, 1758
<i>Spisula subtruncata</i>	da Costa, 1778
<i>Tellimya ferruginosa</i>	Montagu, 1808
<i>Tellina fabula</i>	Gmelin, 1791
<i>Thracia papyracea</i>	Poli, 1791
<i>Venerupis senegalensis</i>	Montagu, 1803

### Mollusques gastropodes

<i>Acteon tornatilis</i>	Linnaeus, 1758
<i>Crepidula fornicata</i>	Linnaeus, 1758
<i>Epitonium</i> (Genr)	
<i>Euspira</i> (Genr)	
<i>Nassarius spygmaeus</i>	Lamarck, 1822
<i>Nassarius reticulatus</i>	Linnaeus, 1758

### Némertes

<i>Golfingia</i> (Genr)	
<i>Nemertina</i> (Phy)	
<i>Tubulanus polymorphus</i>	Renier, 1804

### Autres

<i>Antalis vulgaris</i>	da Costa, 1778
<i>Echiuridae</i> (Fam)	
<i>Phascolion (Phascolion) strombus</i>	Montagu, 1804

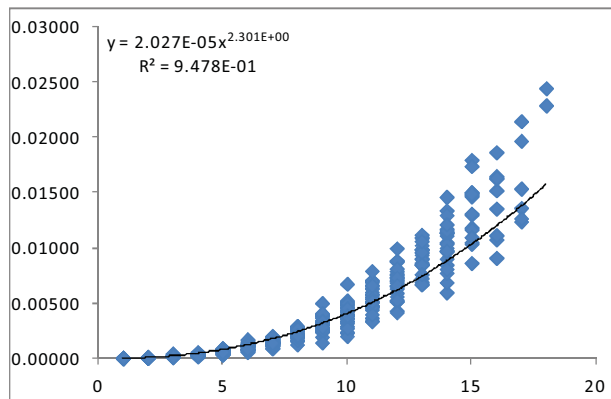
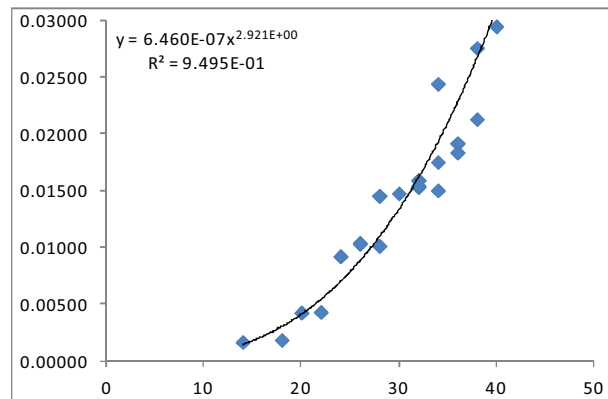
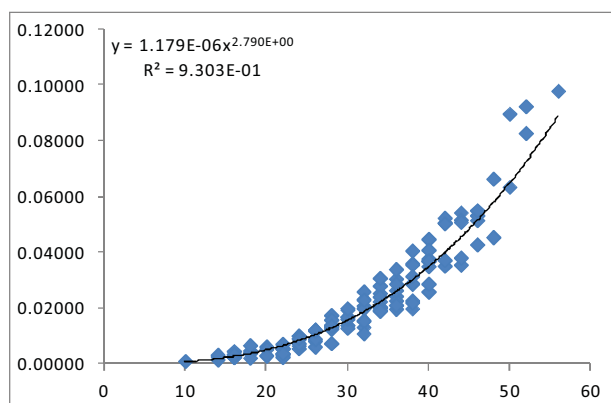
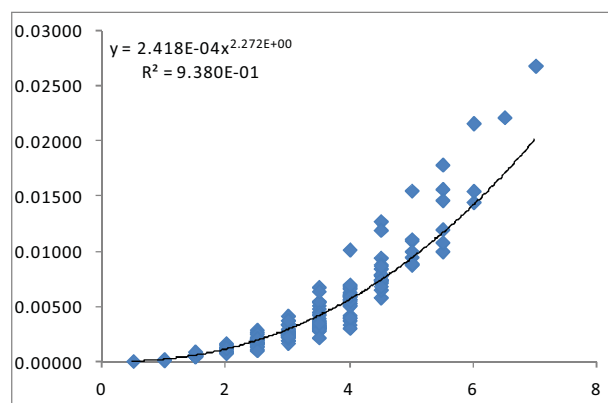
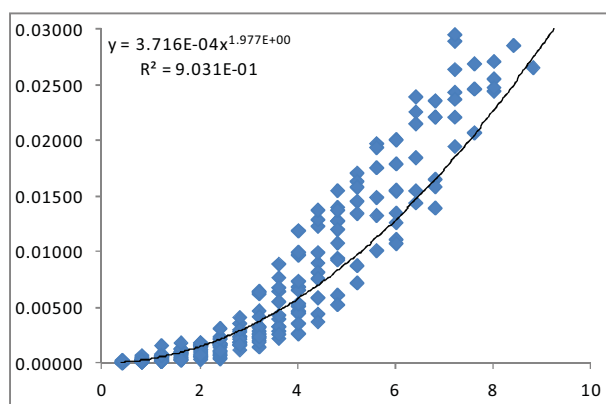
Tableau des abréviations (Ordre alphabétique des abréviations) :

<i>Abra alba</i>	Abr.a	<i>Euspira</i> (Genr)	Gen.Eus	<i>Owenia fusiformis</i>	Owe.f
<i>Acrocnida brachiata</i>	Acr.b	<i>Glycera</i> (Genr)	Gen.Gl	<i>Pandoraina equivalvis</i>	Pan.i
<i>Ampharete baltica</i>	Amph.b	<i>Lumbrineris</i> (Genr)	Gen.Lum	<i>Scoloplos (Scoloplos) armiger</i>	Sco.a
<i>Antalis vulgaris</i>	Ant.v	<i>Lutraria</i> (Genr)	Gen.Lut	<i>Sigalion mathildae</i>	Sig.m
<i>Asterias rubens</i>	Ast.r	<i>Magelona</i> (Genr)	Gen.Ma	<i>Spiophanes bombyx</i>	Spi.b
<i>Corbula gibba</i>	Cor.g	<i>Mya</i> (Genr)	Gen.My	<i>Spisula subtruncata</i>	Spi.s
<i>Ensis ensis</i>	Ens.e	<i>Pholoe</i> (Genr)	Gen.Ph	<i>Sthenelais boa</i>	Sth.b
<i>Ensis magnus</i>	Ens.m	<i>Kurtiella bidentata</i>	Kur.b	<i>Tellina fabula</i>	Tel.f
<i>Eunereis longissima</i>	Eun.l	<i>Lagis koreni</i>	Lag.k	<i>Thia scutellata</i>	Thi.s
<i>Gattyana cirrhosa</i>	Gat.c	<i>Mactra stultorum</i>	Mac.s	<i>Tubulanus polymorphus</i>	Tub.p
<i>Caulleriella</i> (Genr)	Gen.Ca	<i>Melinna palmata</i>	Meln.p	<i>Venerupis senegalensis</i>	Ven.s
<i>Chaetozone</i> (Genr)	Gen.Ch	<i>Nephtys cirrosa</i>	Nep.c		
<i>Eumida</i> (Genr)	Gen.Eum	<i>Nucula nitidosa</i>	Nuc.n		



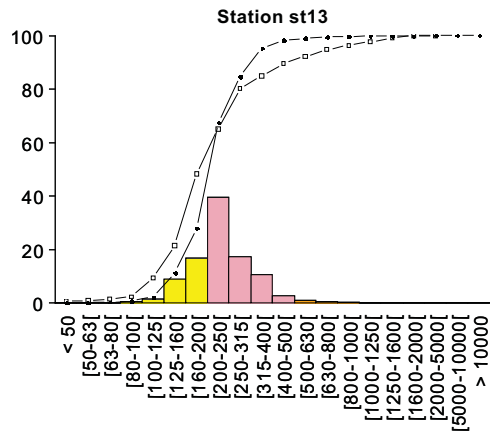
*Courbes allométriques représentant les mesures de biomasses (g de PSLC) par classes de taille des individus chez Abra alba, Ensis directus, Ensis magnus, Lagis koreni, Owenia fusiformis, récoltés lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009.*

*L'axe des abscisses représente la taille des individus en mm et l'axe des ordonnées représente la biomasse estimée en g par la méthode du PSLC.*

*Abra alba**Ensis magnus**Ensis directus**Lagis koreni**Owenia fusiformis*

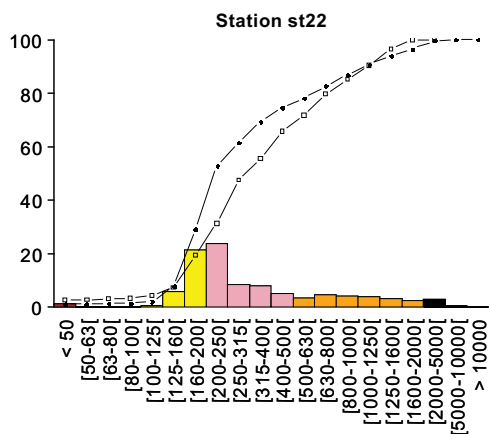
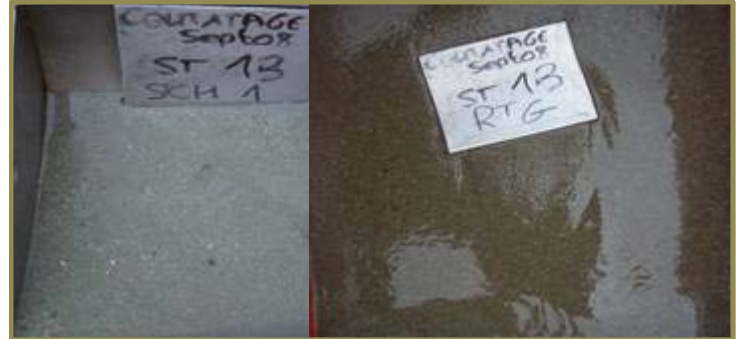
***Histogrammes et courbes cumulées des pourcentages pondéraux des différentes fractions granulométriques issues des analyses de prélèvement sédimentaires réalisés lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009 et photographies.***

*Les courbes cumulées marquées de carrés correspondent aux prélèvements réalisés à la benne Shipeck, les histogrammes et les courbes cumulées marquées de ronds pleins correspondent aux prélèvements réalisés à la benne Van Veen.*



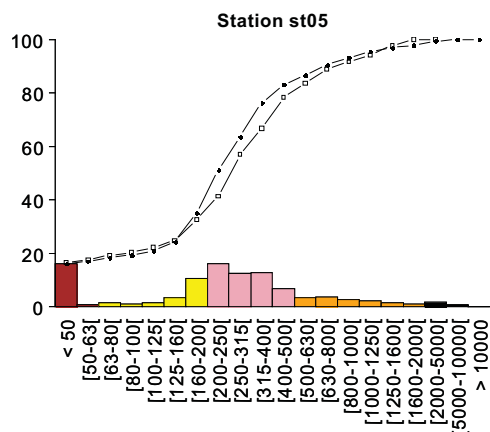
Schipect (SCH)

Van Veen (VVG)



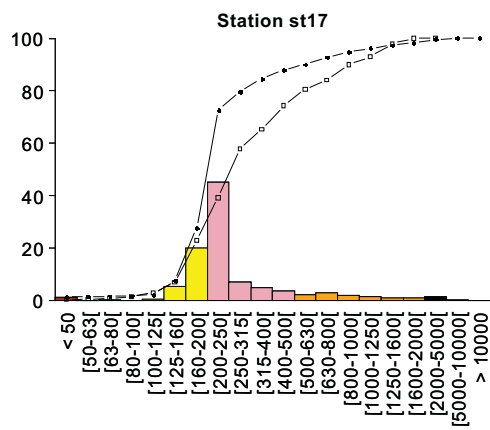
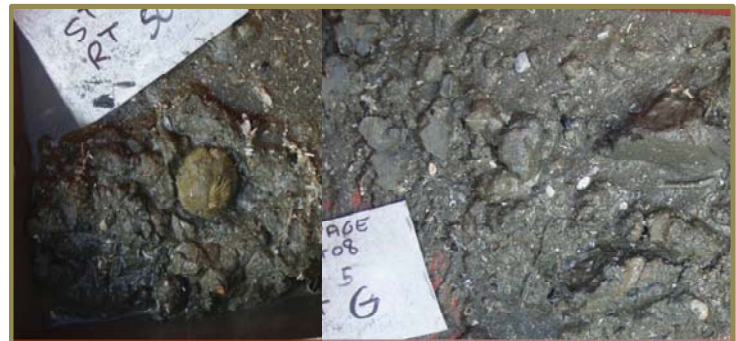
Schipect (SCH)

Van Veen (VVG)



Schipect (SCH)

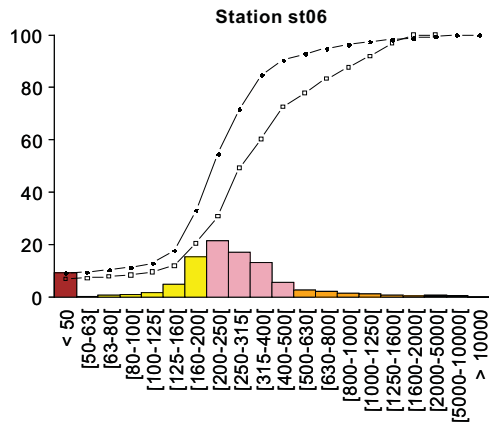
Van Veen (VVG)



Schipect (SCH)

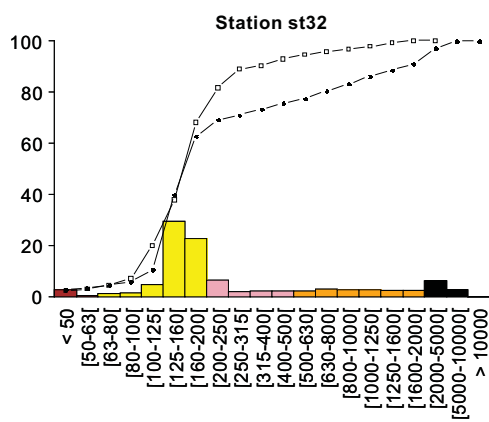
Van Veen (VVG)





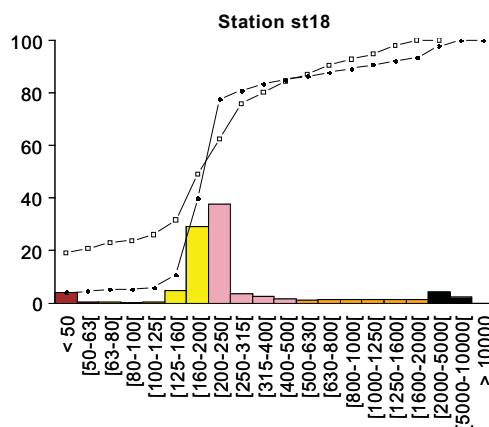
Schipect (SCH)

Van Veen (VVG)



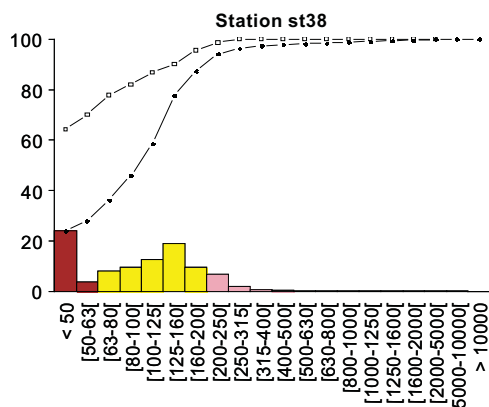
Schipect (SCH)

Van Veen (VVG)



Schipect (SCH)

Van Veen (VVG)

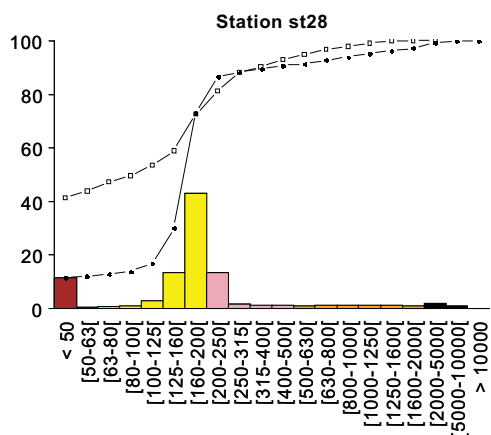


Schipect (SCH)

Van Veen (VVG)

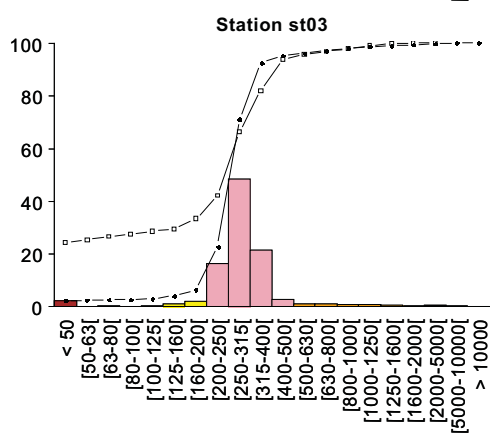






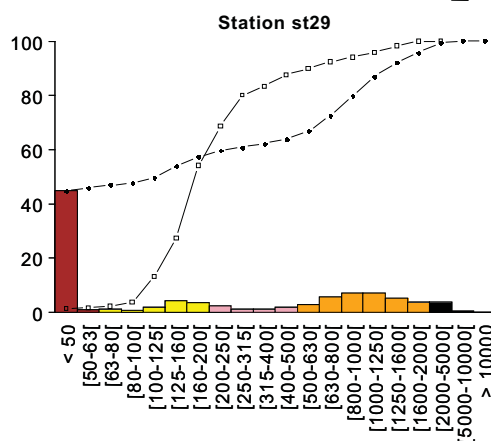
Schipect (SCH)

Van Veen (VVG)



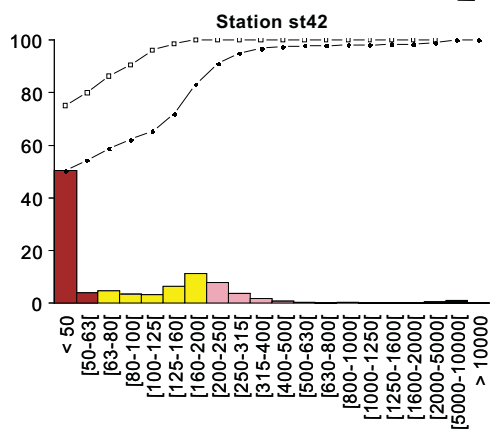
Schipect (SCH)

Van Veen (VVG)



Schipect (SCH)

Van Veen (VVG)



Schipect (SCH)

Van Veen (VVG)



*Planches des photographies des prélèvements sédimentaires réalisés à la benne Van Veen et à la benne Shipeck lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009 illustrant le principe du codage réalisé pour l'étude de la texture sédimentaire.*



## Codage de la présence de galets mous en surface



Station 14 VVG  
(2008)

Station 17 SCH  
(2008)

« GM1 »

Station 48 VV1  
(2009)

Station 39 SCH  
(2009)

« GM2 »

Station 46 SCH  
(2009)

Station 46 VVG  
(2009)

« GM3 »

## Codage de la présence de vase fluide en surface



Station 19 VV4  
(2009)

Station 39 VV2  
(2009)

« VF1 »

Station 25 SCH  
(2008)

Station 36 SCH  
(2009)

« VF2 »

Station 38 VV5  
(2009)

Station 36 VVG  
(2008)

« VF3 »

Codage des notions de remaniement sédimentaire, cohésion sédimentaire, variation verticale de faciès et d'hétérogénéité entre répliquats



**Station 6 (2008)**

**Codage**

HE1  
STnon  
VF0  
G0  
REmelSV  
COHnon

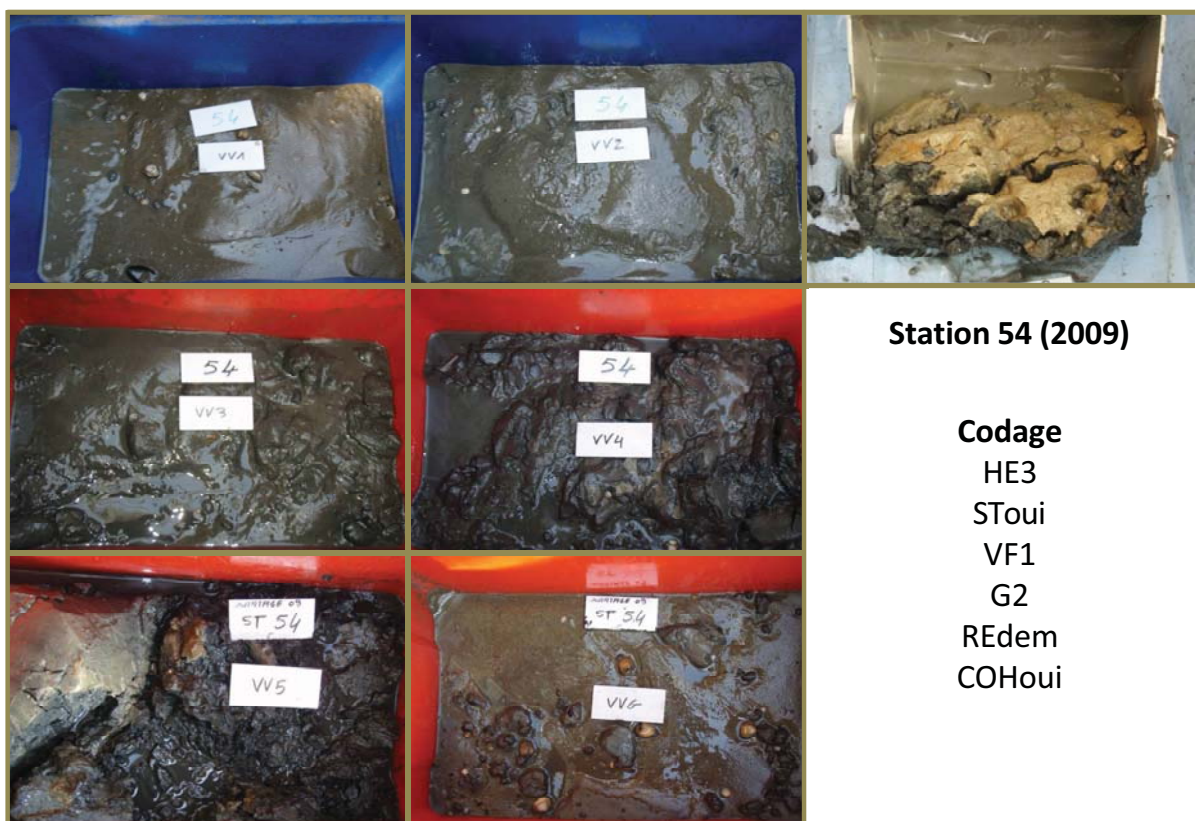


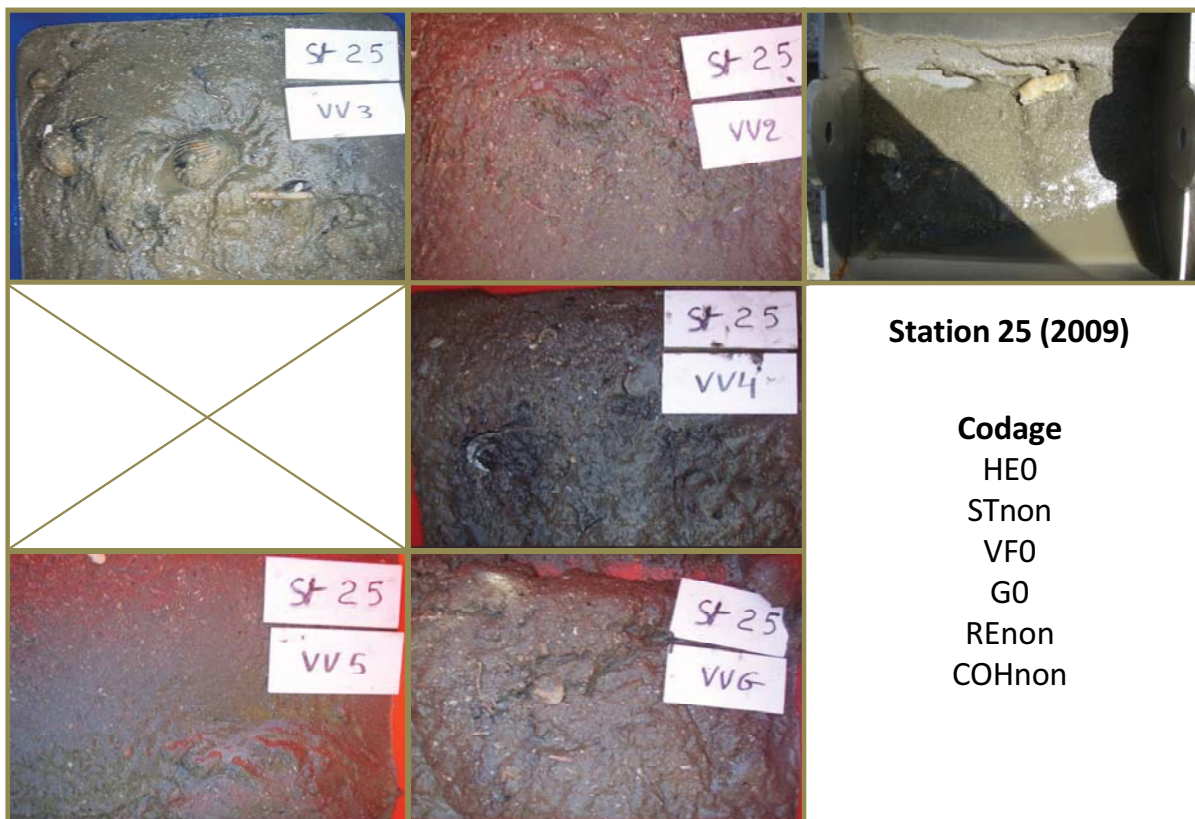
**Station 2 (2008)**

**Codage**

HE1  
SToui  
VF1  
G0  
REmelSV  
COHoui



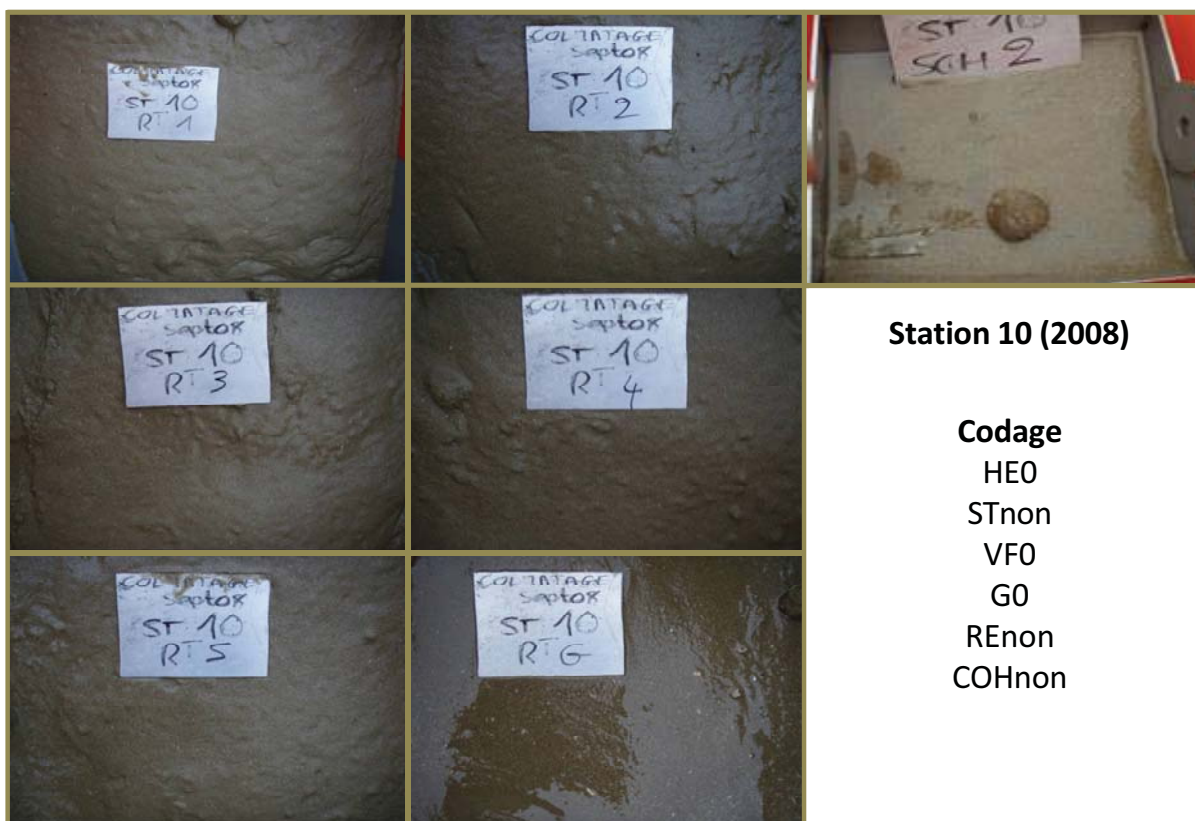




**Station 25 (2009)**

**Codage**

HE0  
STnon  
VF0  
G0  
REnon  
COHnon

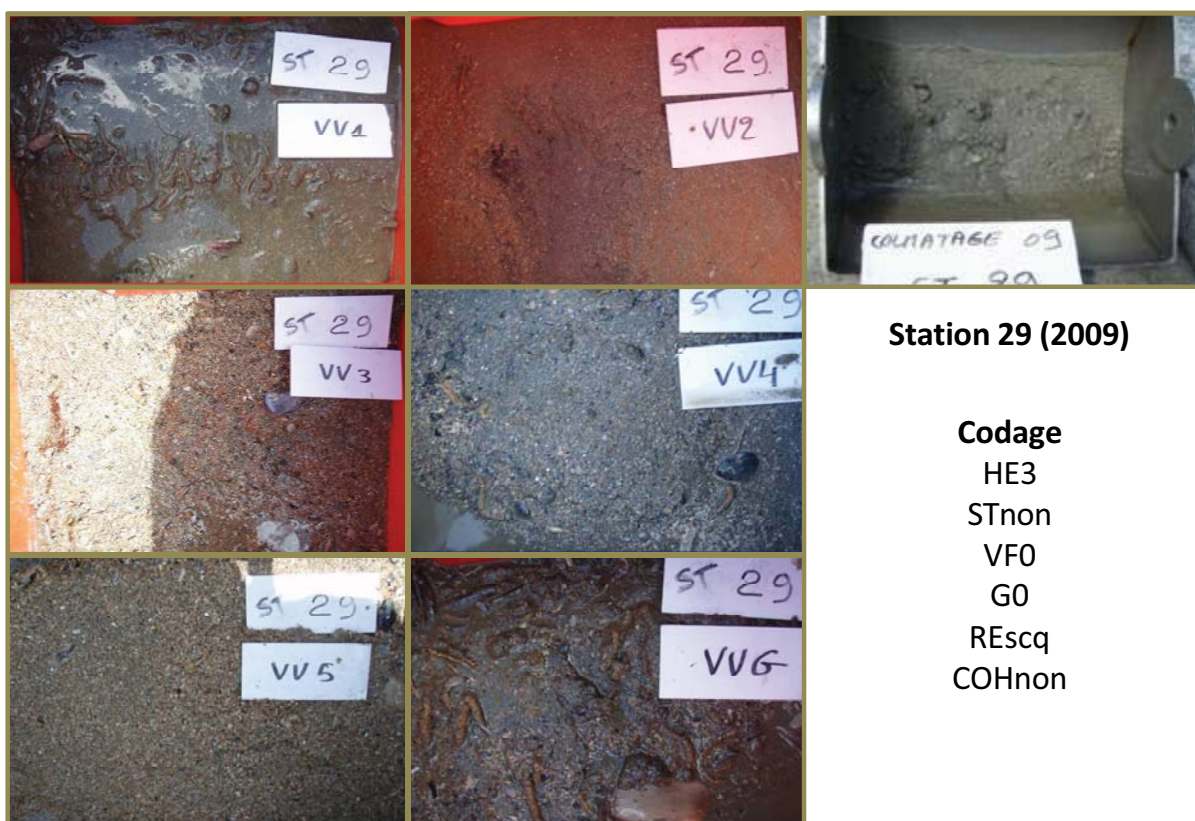


**Station 10 (2008)**

**Codage**

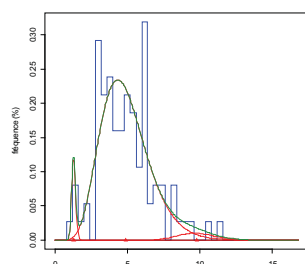
HE0  
STnon  
VF0  
G0  
REnon  
COHnon



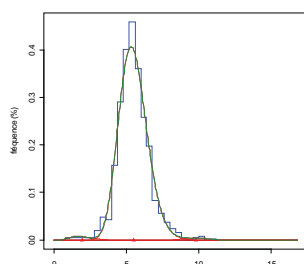


*Histogrammes de fréquence des classes de tailles et cohortes modélisées pour Abra alba, Lagis koreni, Owenia fusiformis et Phaxas pellucidus à partir des données de biométries sur les individus récoltés lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009.*

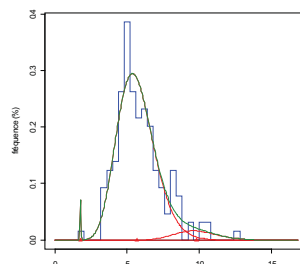
*Ces graphes sont extraits du rapport de stage de M1 de Thomas Anquez (2011).*

*Owenia fusiformis* (COLMATAGE 2008)

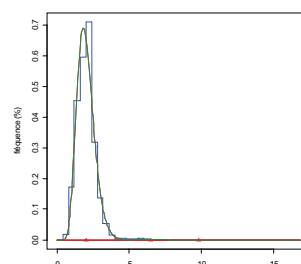
Station 01



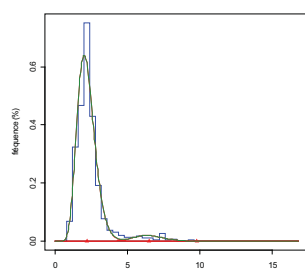
Station 02



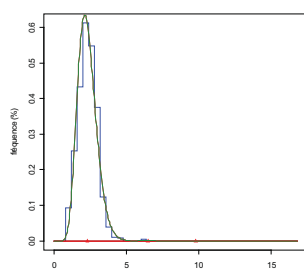
Station 03



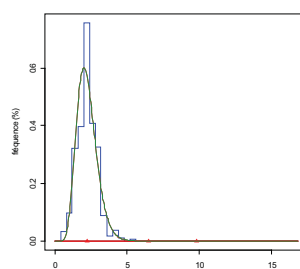
Station 15



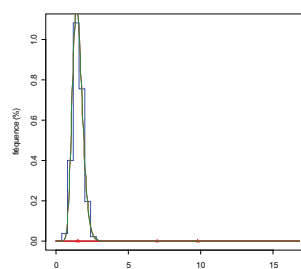
Station 16



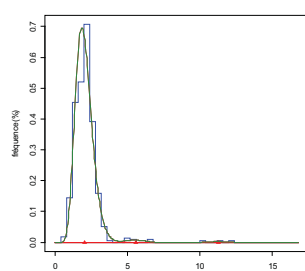
Station 19



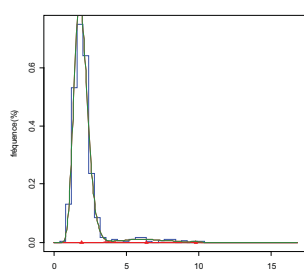
Station 20



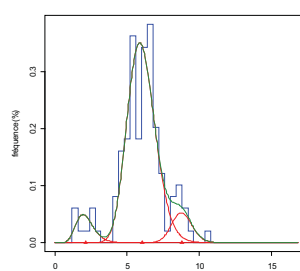
Station 21



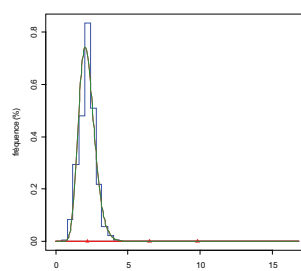
Station 25



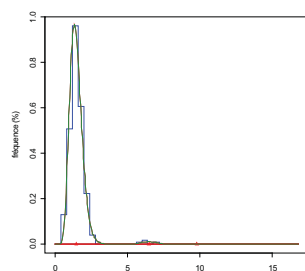
Station 26



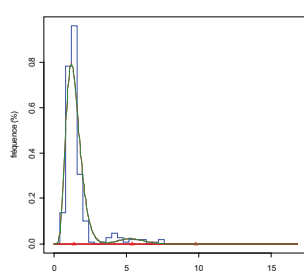
Station 27



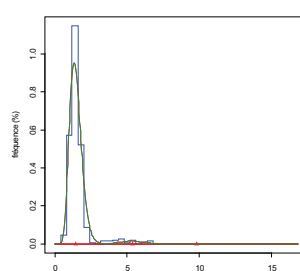
Station 28



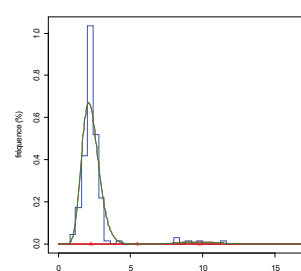
Station 29



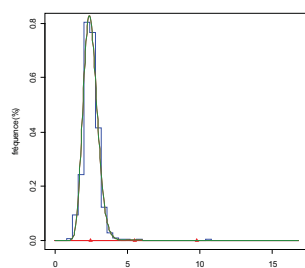
Station 30



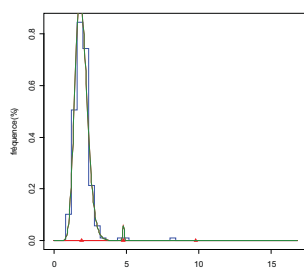
Station 31



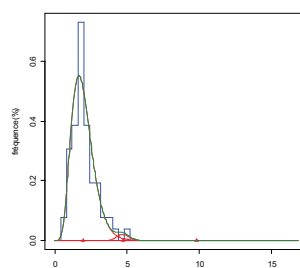
Station 32



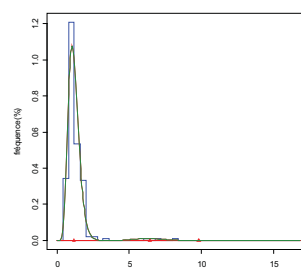
Station 33



Station 34

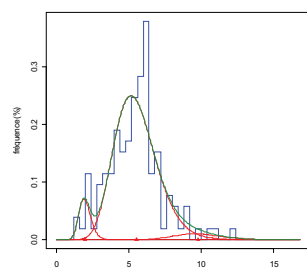


Station 38

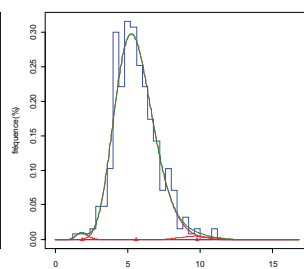


Station 44

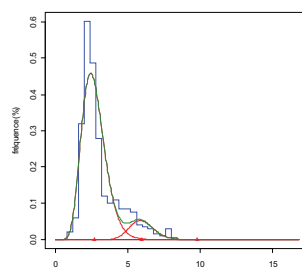


*Owenia fusiformis* (COLMATAGE 2009)

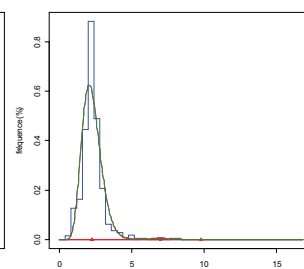
Station 01



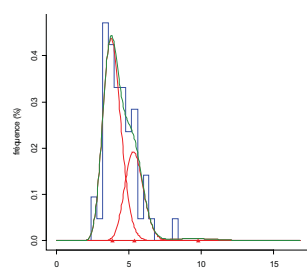
Station 02



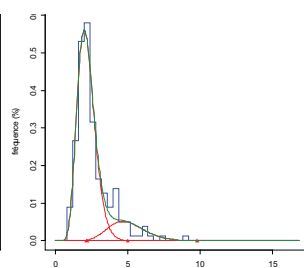
Station 15



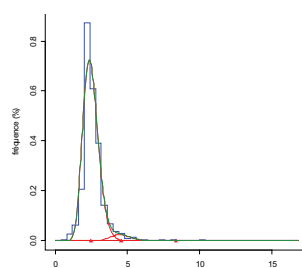
Station 16



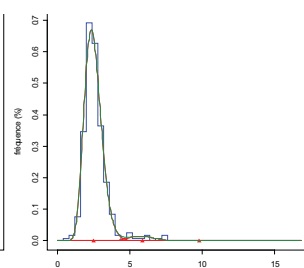
Station 20



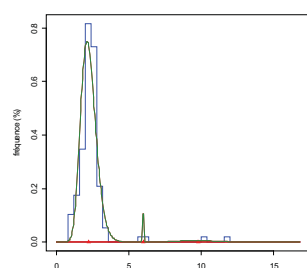
Station 21



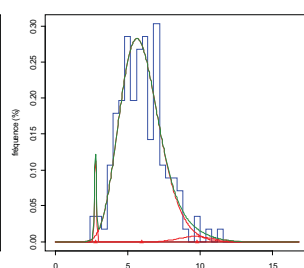
Station 26



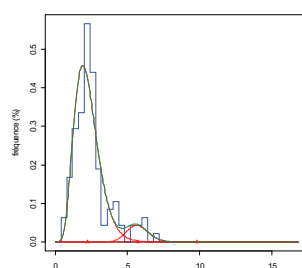
Station 27



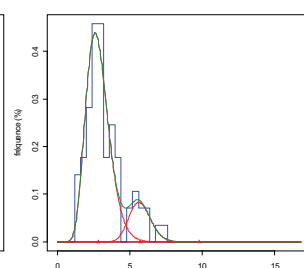
Station 29



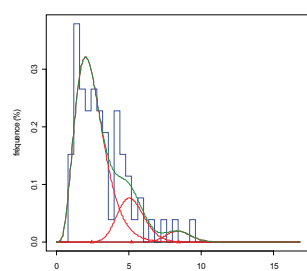
Station 30



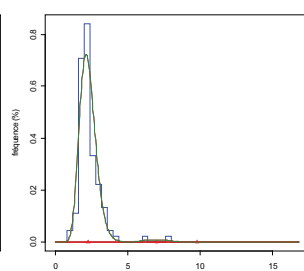
Station 32



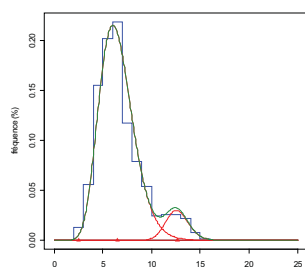
Station 33



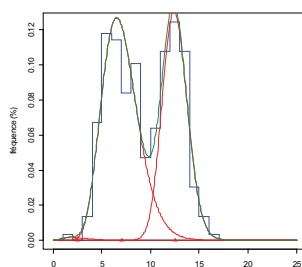
Station 34



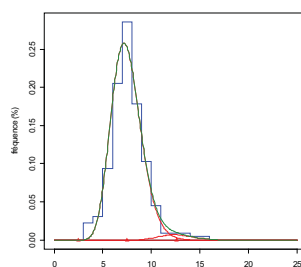
Station 44

*Abra alba* (COLMATAGE 2008)

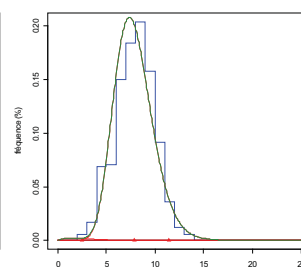
Station 02



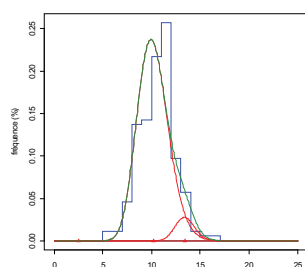
Station 03



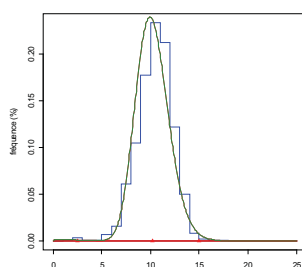
Station 05



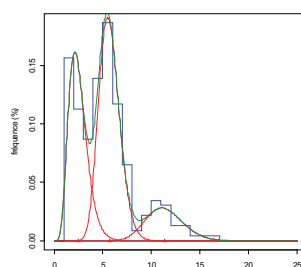
Station 07



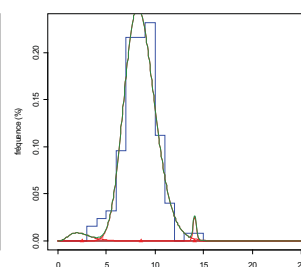
Station 15



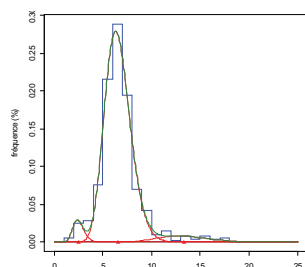
Station 16



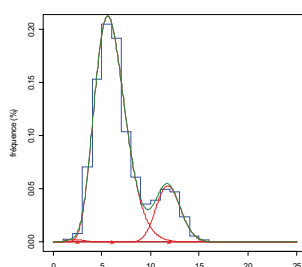
Station 20



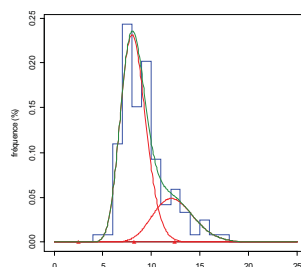
Station 21



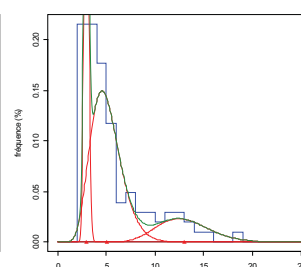
Station 25



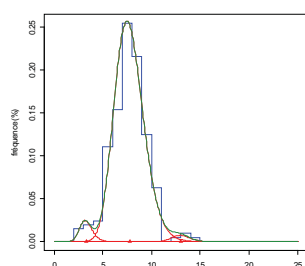
Station 26



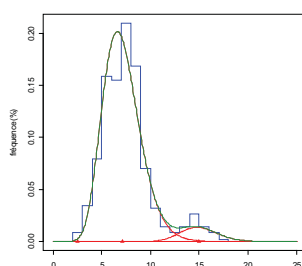
Station 27



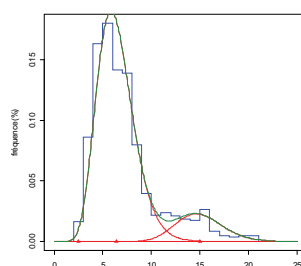
Station 28



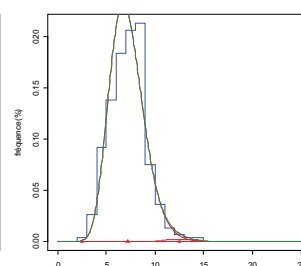
Station 29



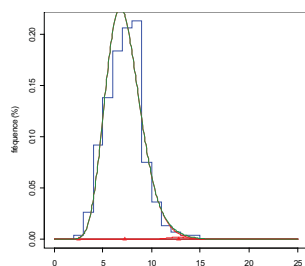
Station 30



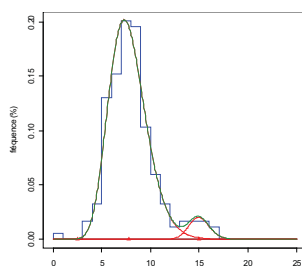
Station 31



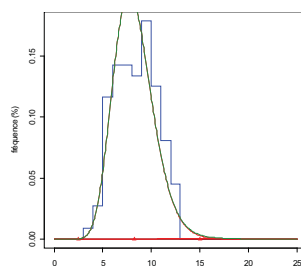
Station 34



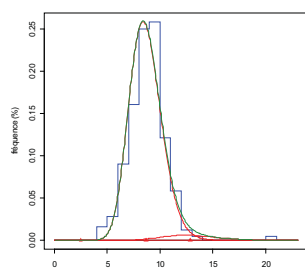
Station 38



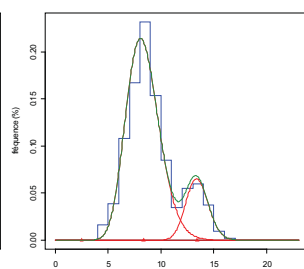
Station 44



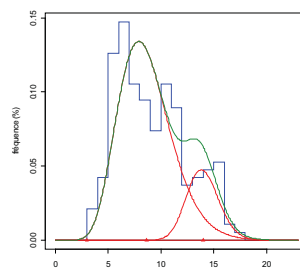
Station 52

*Abra alba* (COLMATAGE 2009)

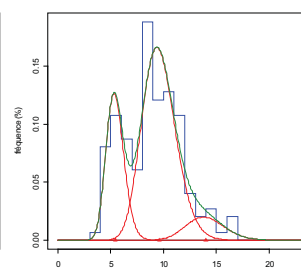
Station 01



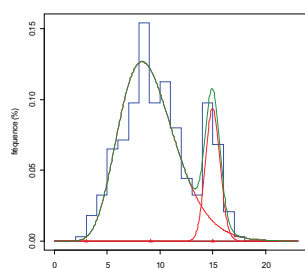
Station 02



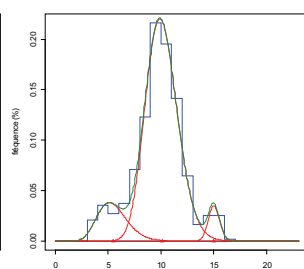
Station 03



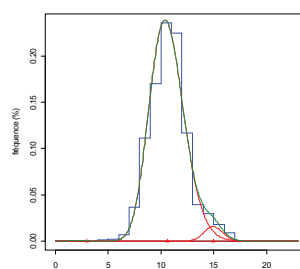
Station 05



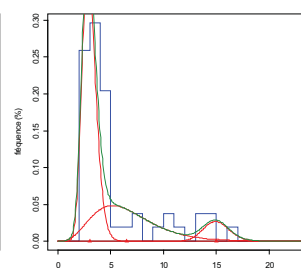
Station 07



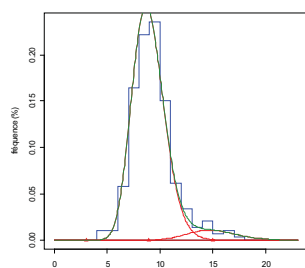
Station 15



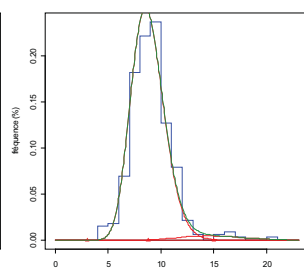
Station 16



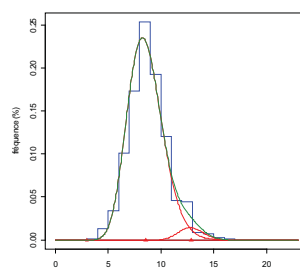
Station 18



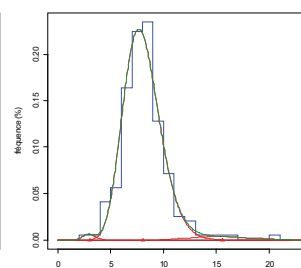
Station 21



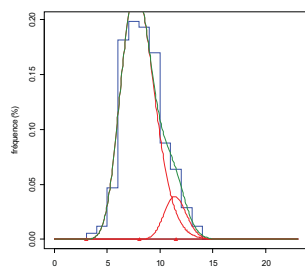
Station 25



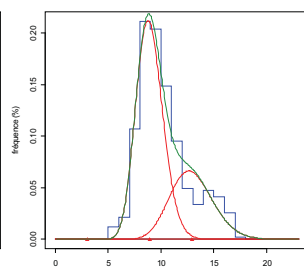
Station 26



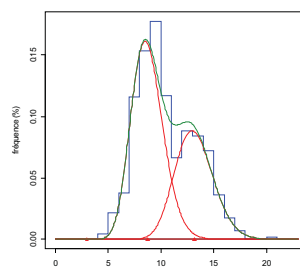
Station 27



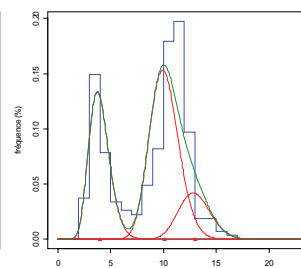
Station 29



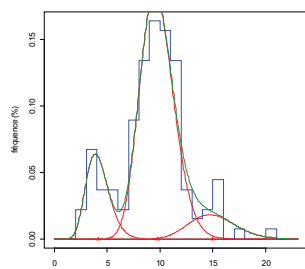
Station 30



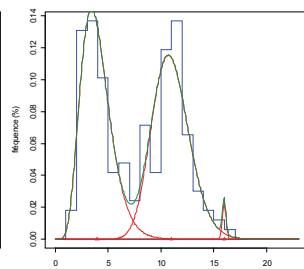
Station 31



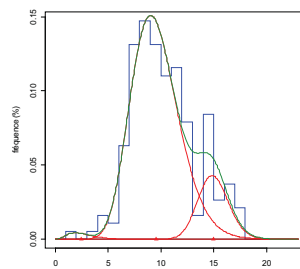
Station 32



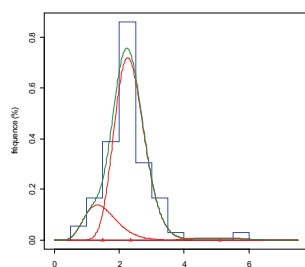
Station 33



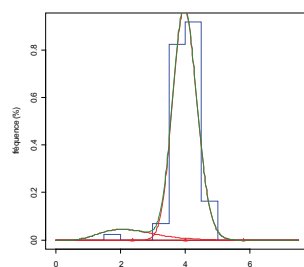
Station 34



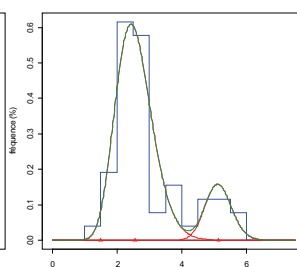
Station 44

*Lagis koreni* (COLMATAGE 2008)

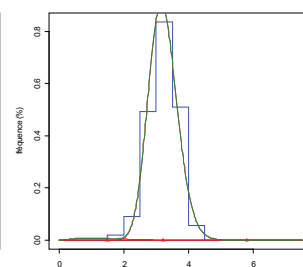
Station 02



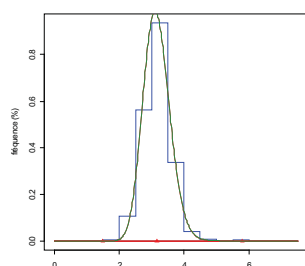
Station 06



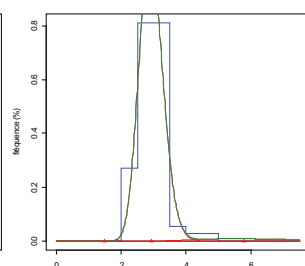
Station 07



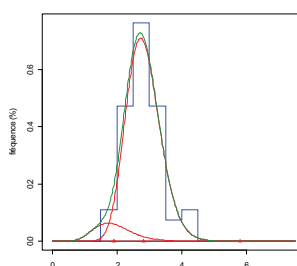
Station 15



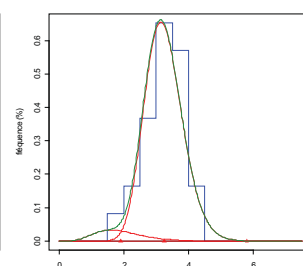
Station 16



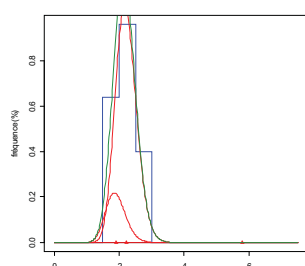
Station 19



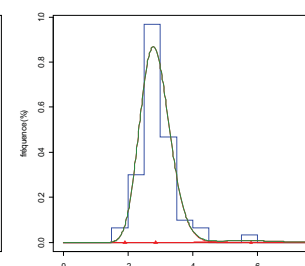
Station 20



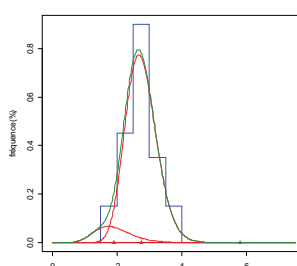
Station 21



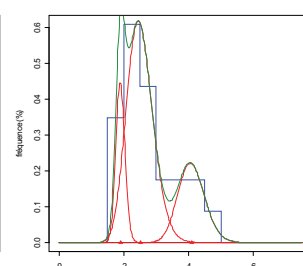
Station 25



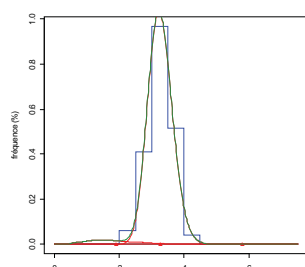
Station 26



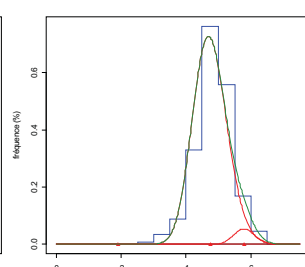
Station 29



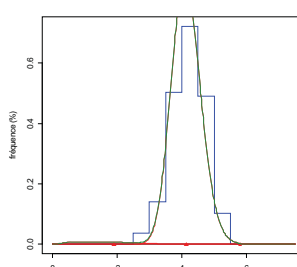
Station 31



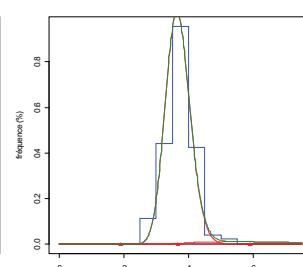
Station 32



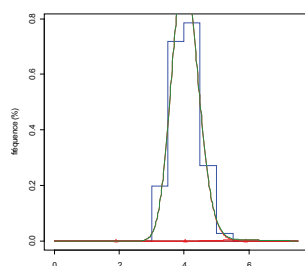
Station 38



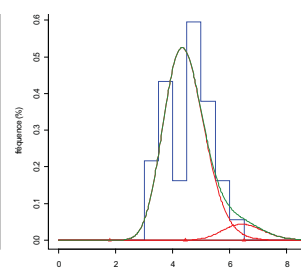
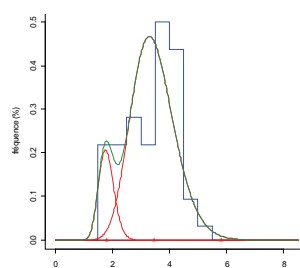
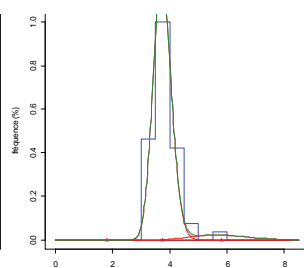
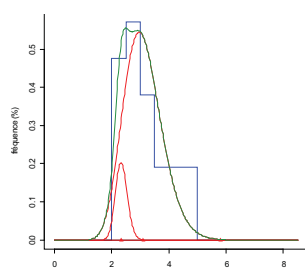
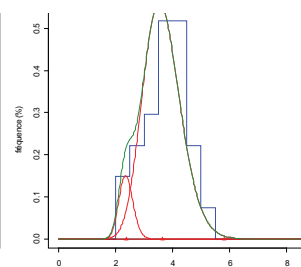
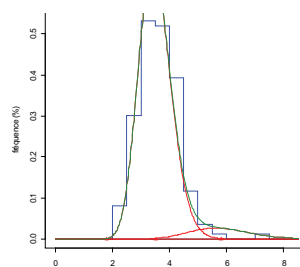
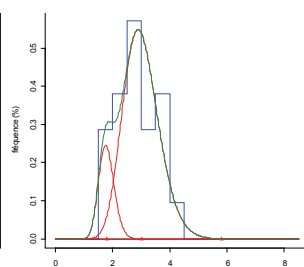
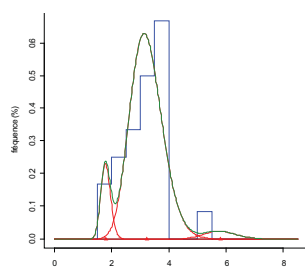
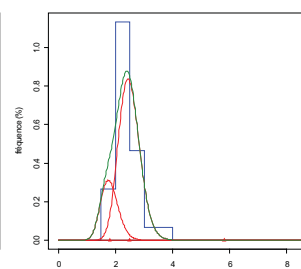
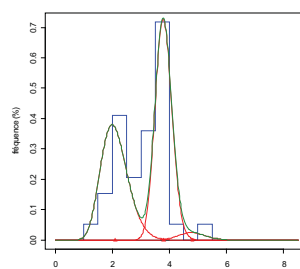
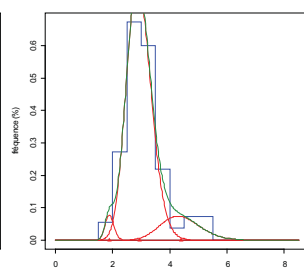
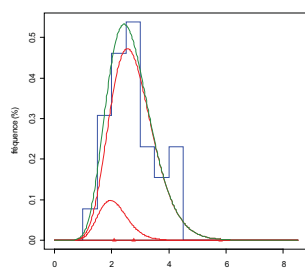
Station 52

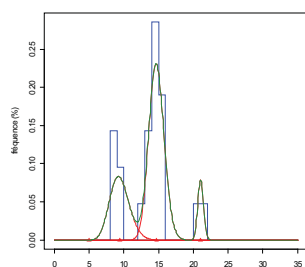


Station 53

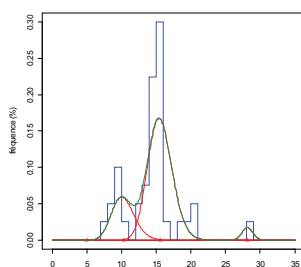


Station 54

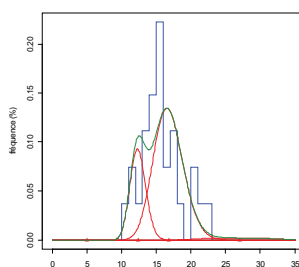
*Lagis koreni* (COLMATAGE 2009)

*Phaxas pellucidus* (COLMATAGE 2008)

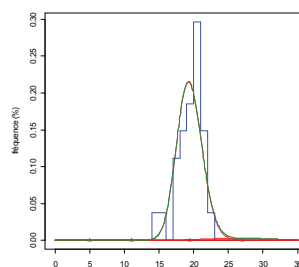
Station 02



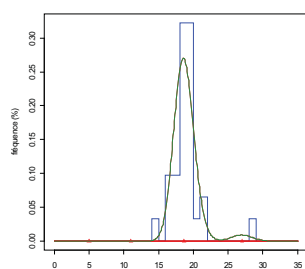
Station 03



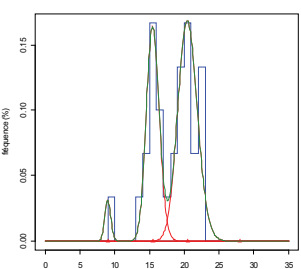
Station 07



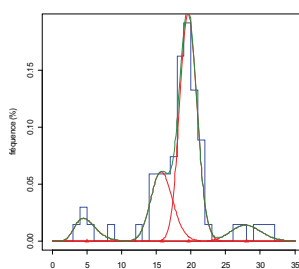
Station 15



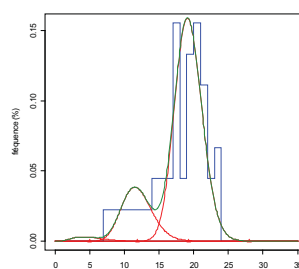
Station 16



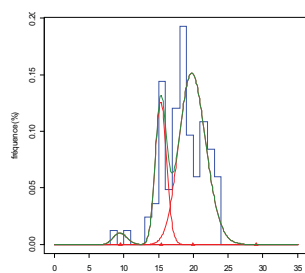
Station 18



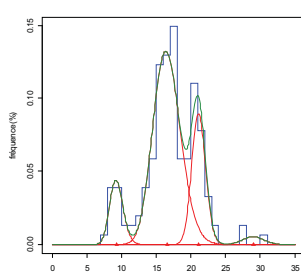
Station 19



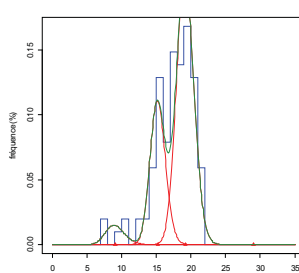
Station 22



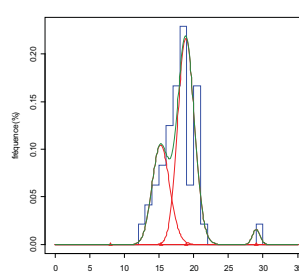
Station 23



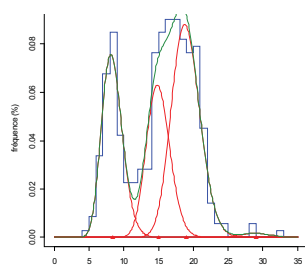
Station 24



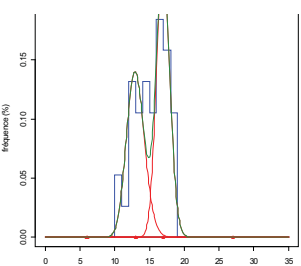
Station 25



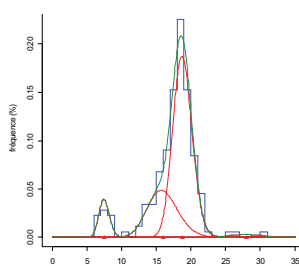
Station 26



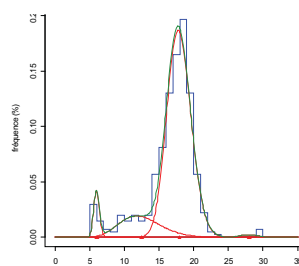
Station 28



Station 29

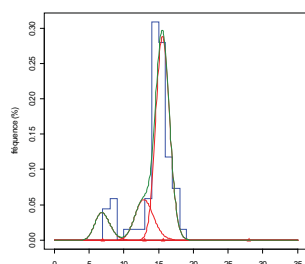


Station 30

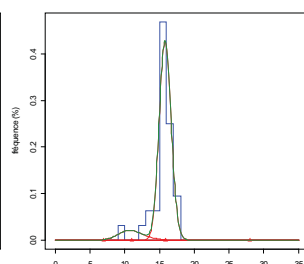


Station 31

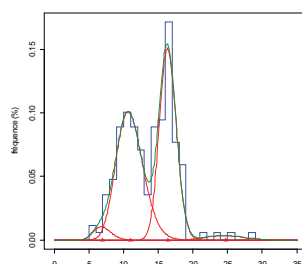


*Phaxas pellucidus* (COLMATAGE 2009)

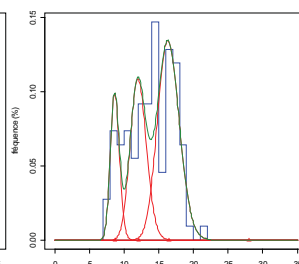
Station 01



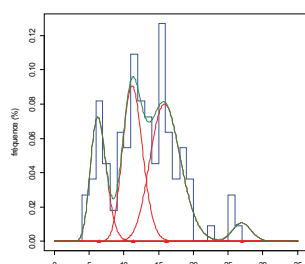
Station 02



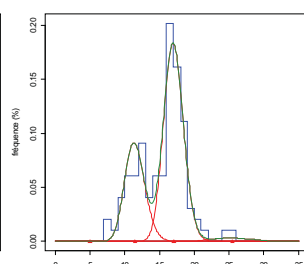
Station 03



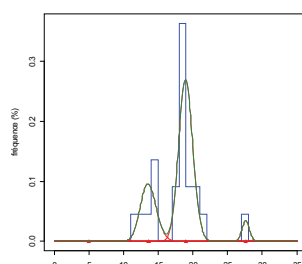
Station 05



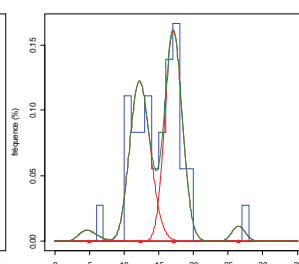
Station 06



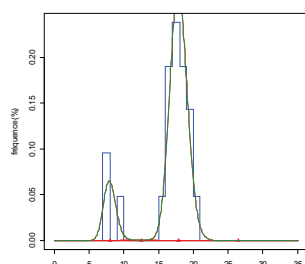
Station 07



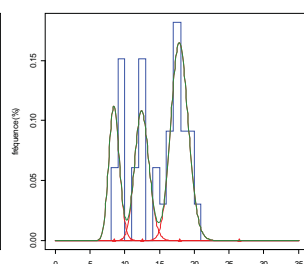
Station 09



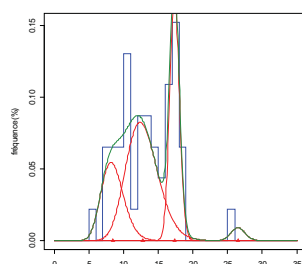
Station 14



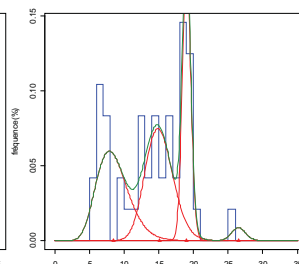
Station 16



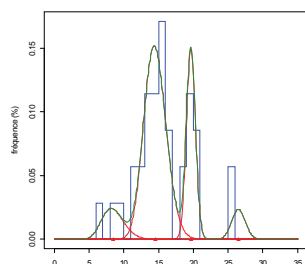
Station 17



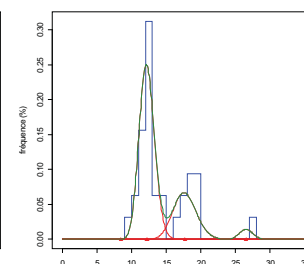
Station 18



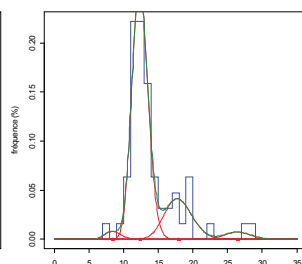
Station 19



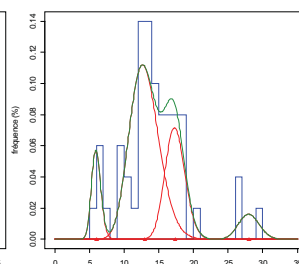
Station 20



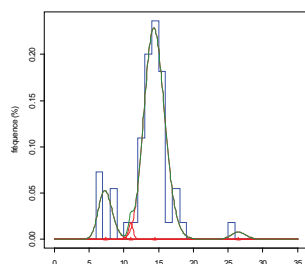
Station 22



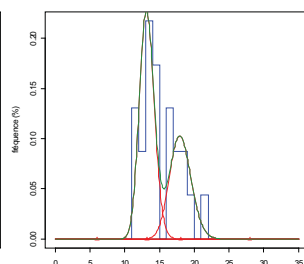
Station 23



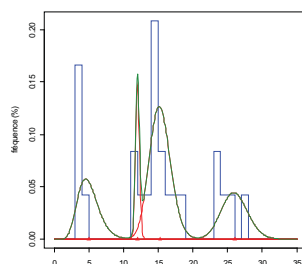
Station 24



Station 25



Station 26

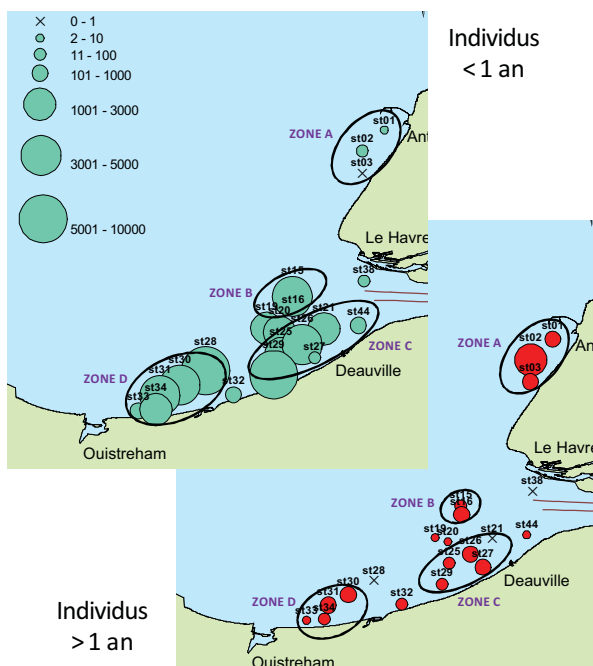


Station 30

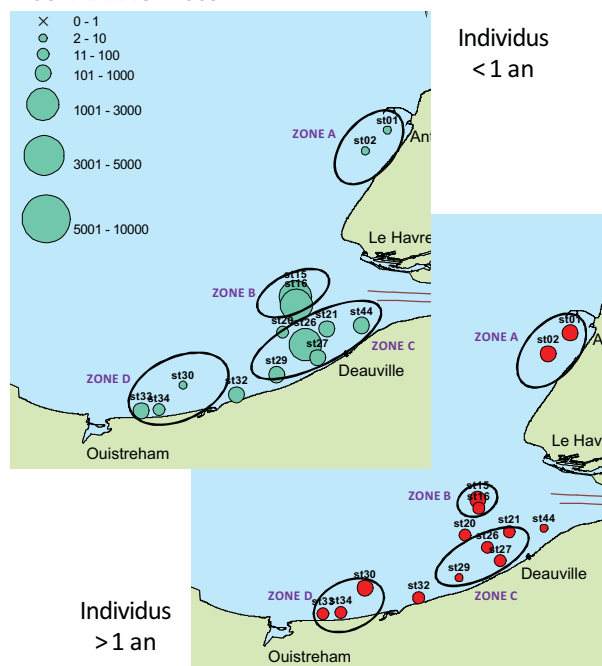
*Cartes de distribution spatiale des individus de moins de un an et des individus de plus de un an chez Abra alba, Lagis koreni, Owenia fusiformis et Phaxas pellucidus récoltés lors des campagnes COLMATAGE 2008 et 2009.*

*Ces graphes sont extraits du rapport de stage de M1 de Thomas Anquez (2011).*

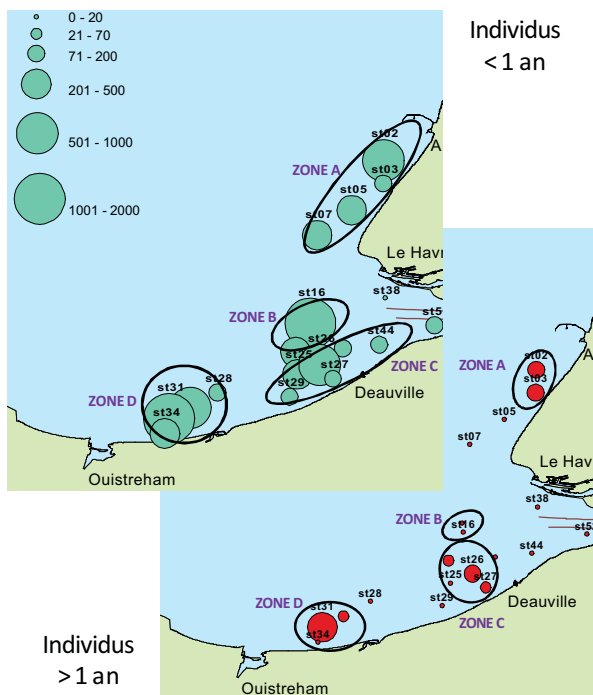
*Owenia fusiformis*  
COLMATAGE 2008



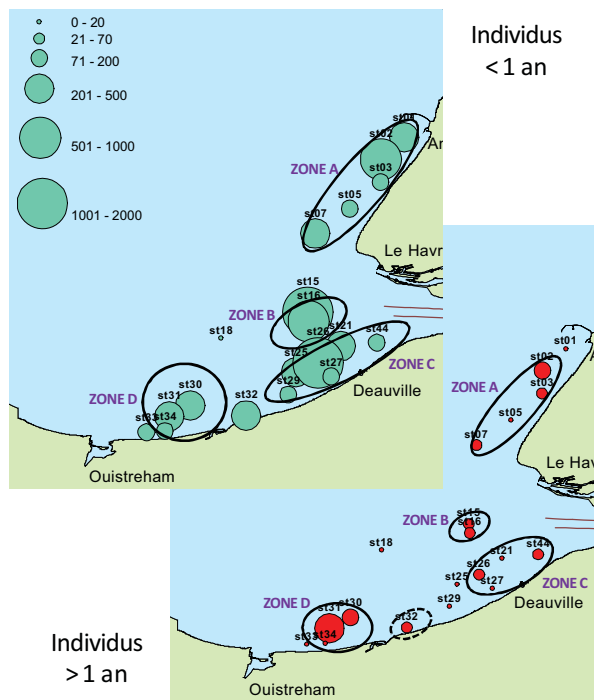
*Owenia fusiformis*  
COLMATAGE 2009



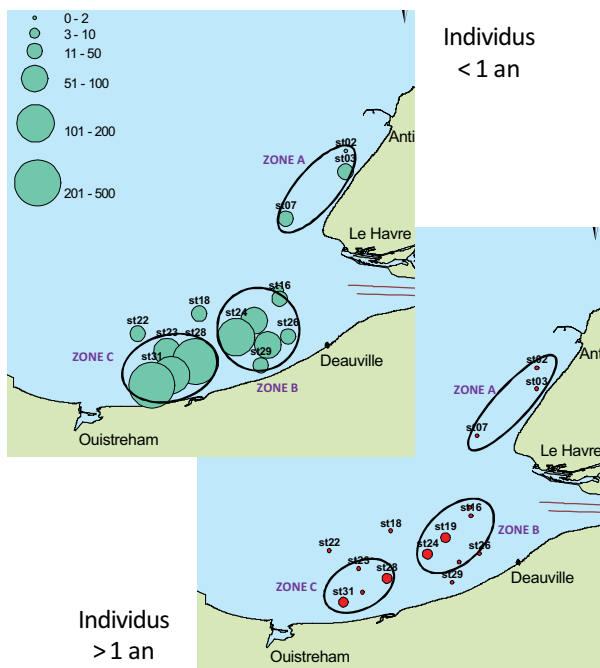
*Abra alba*  
COLMATAGE 2008



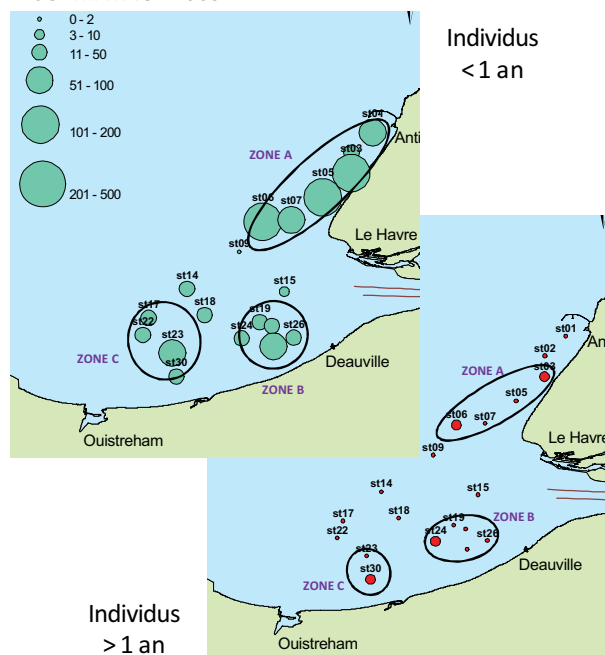
*Abra alba*  
COLMATAGE 2009



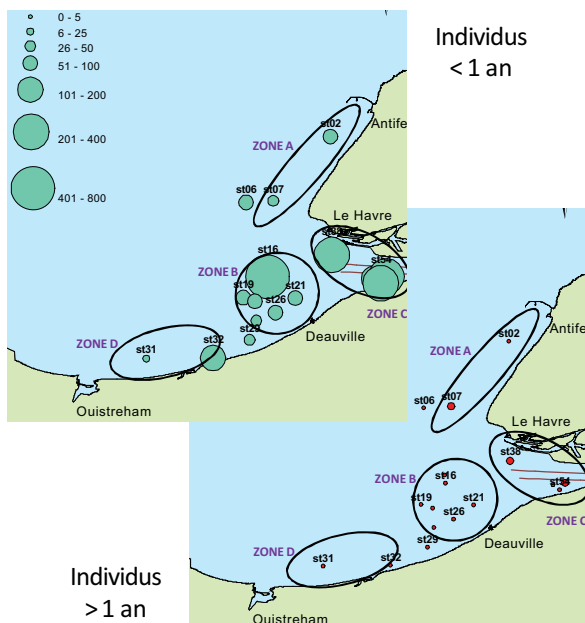
*Phaxas pellucidus*  
COLMATAGE 2008



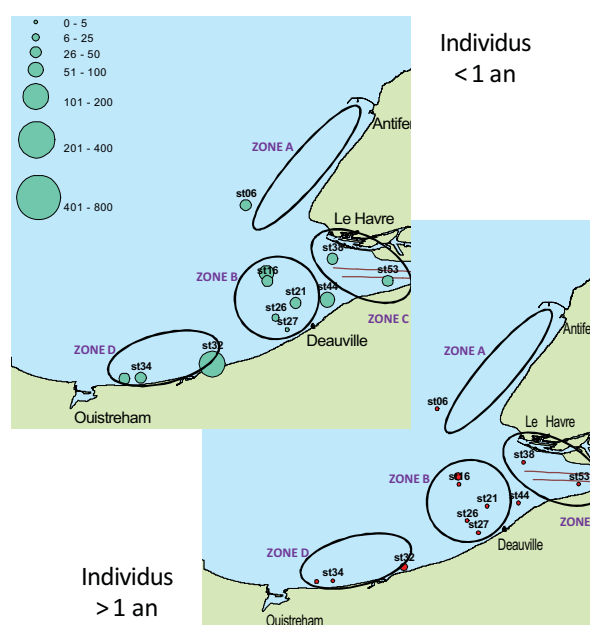
*Phaxas pellucidus*  
COLMATAGE 2009



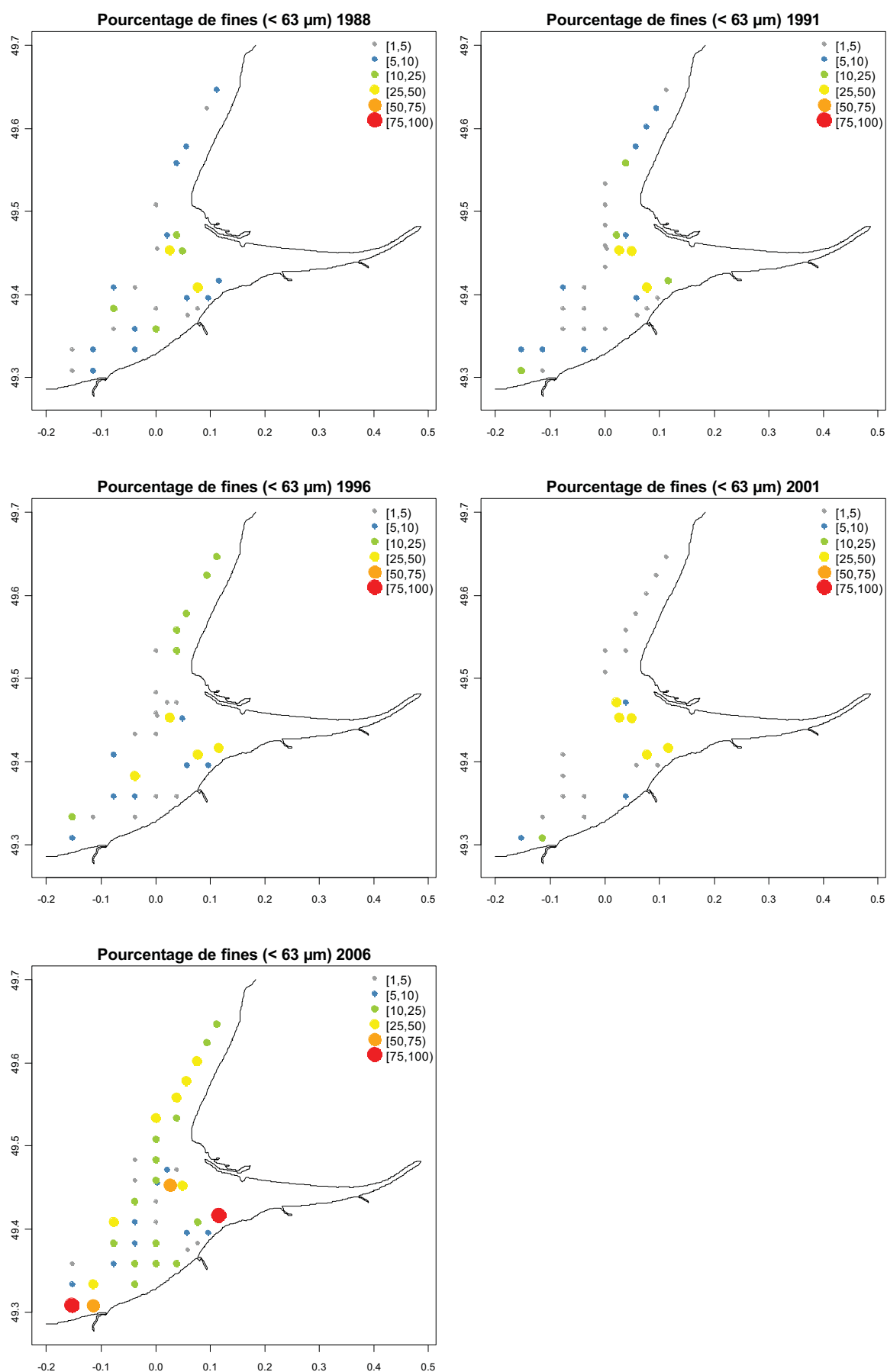
*Lagis koreni*  
COLMATAGE 2008



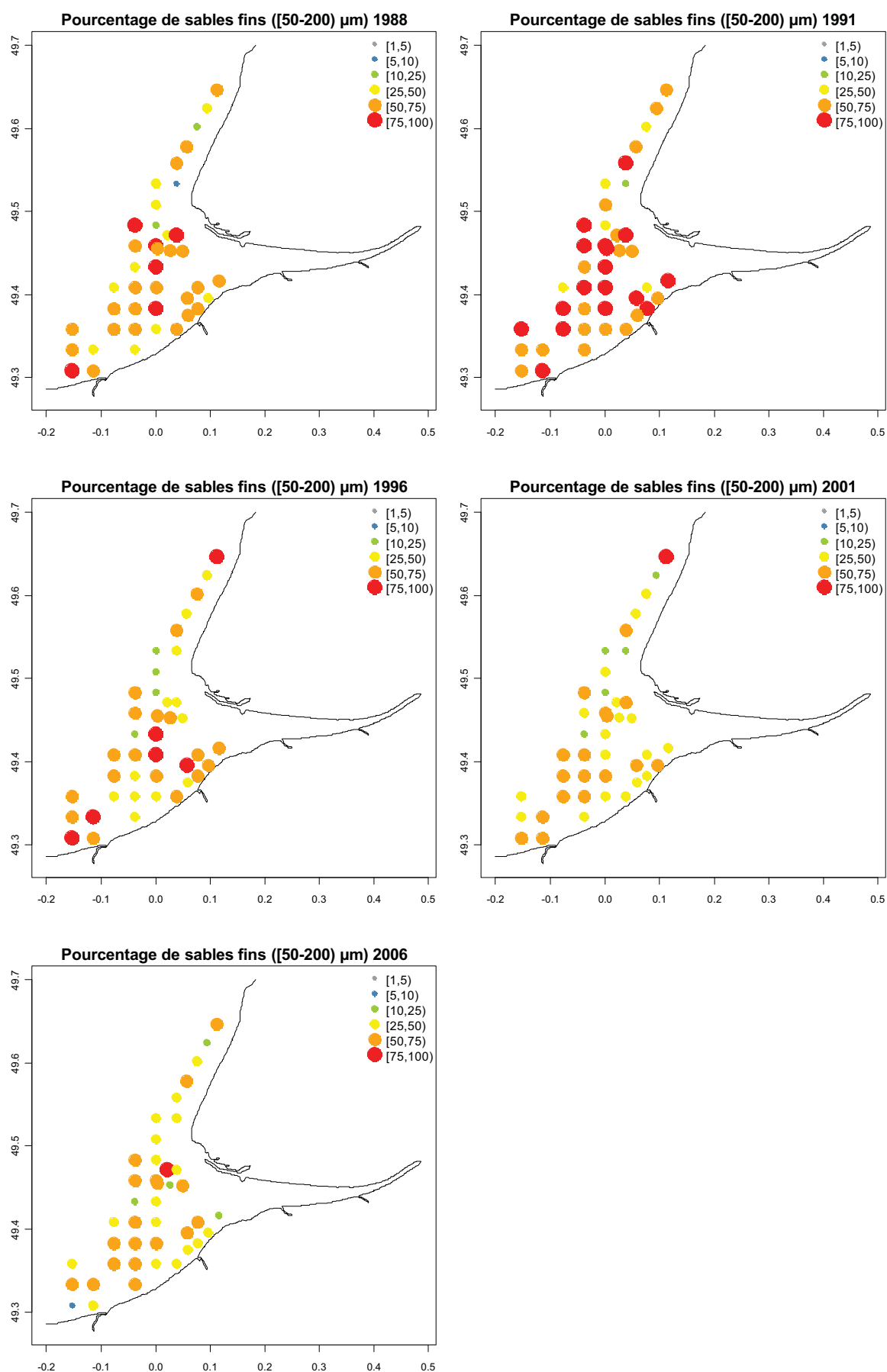
*Lagis koreni*  
COLMATAGE 2009

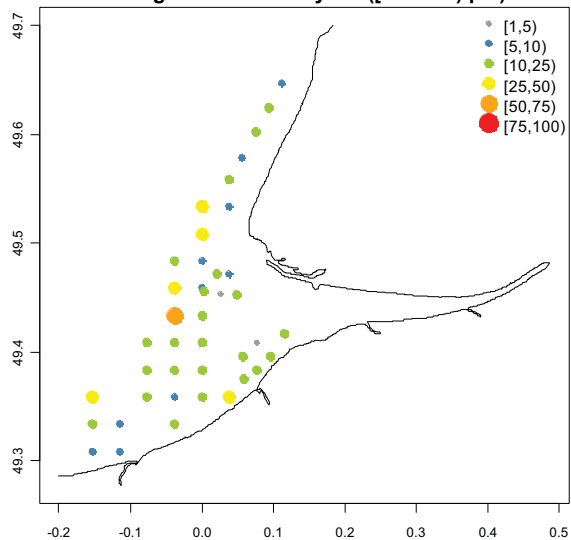
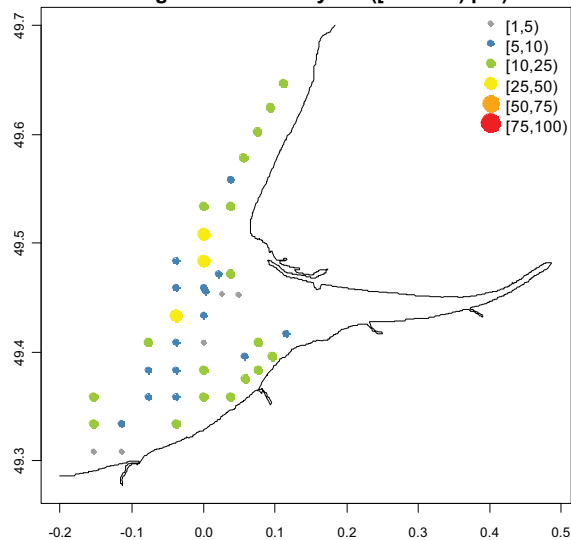
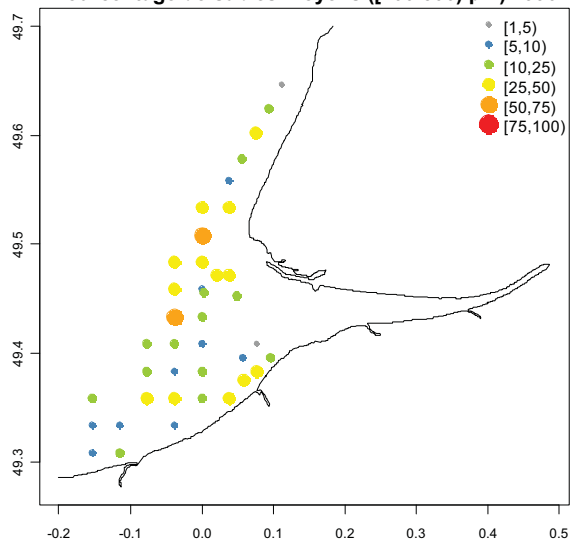
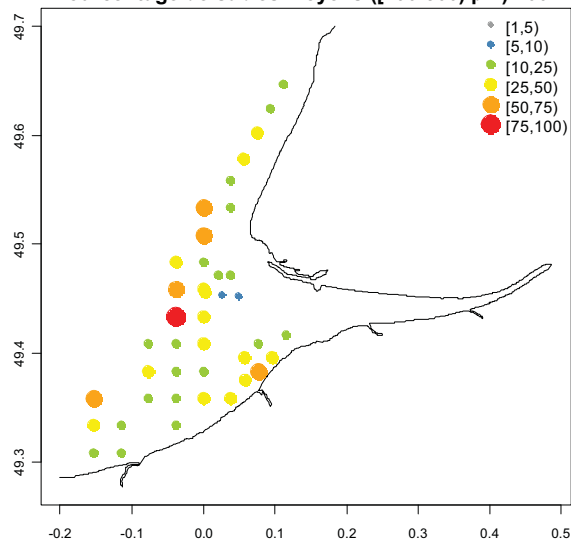
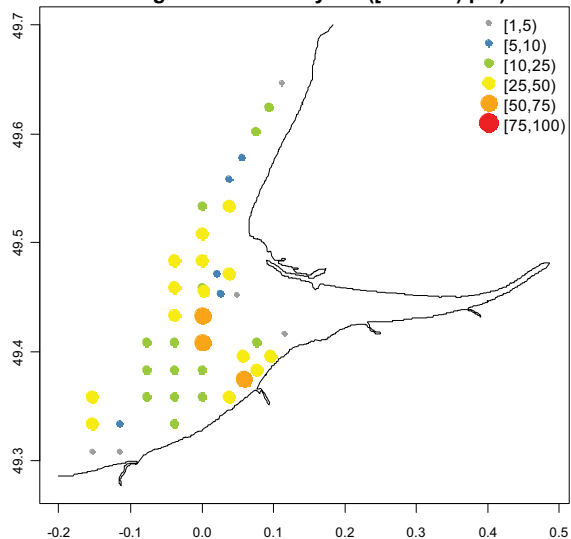


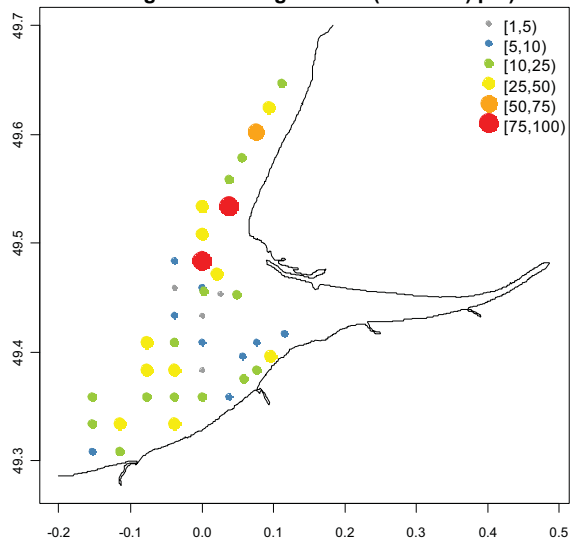
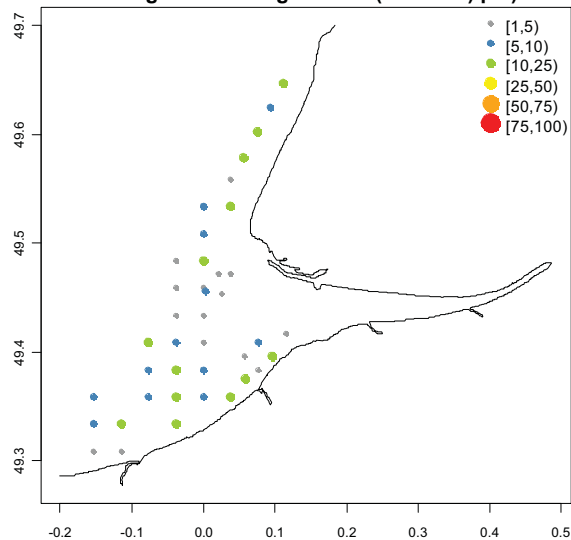
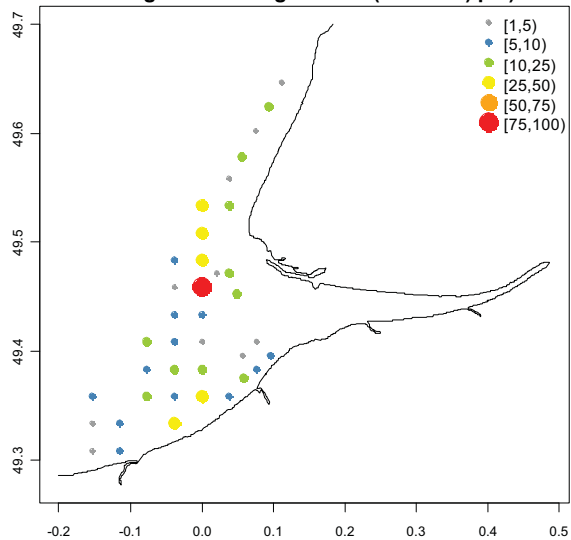
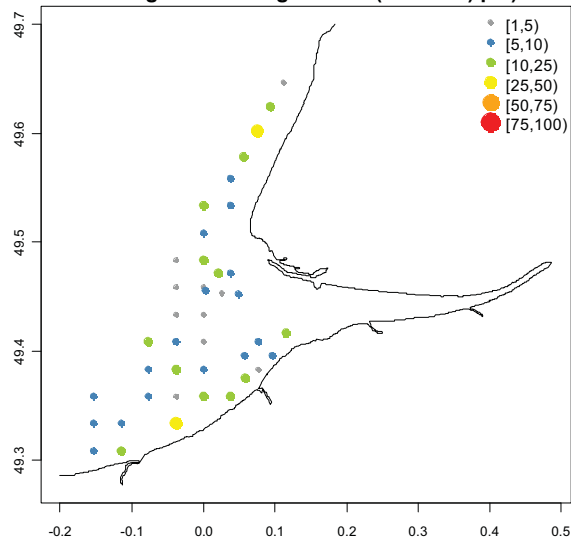
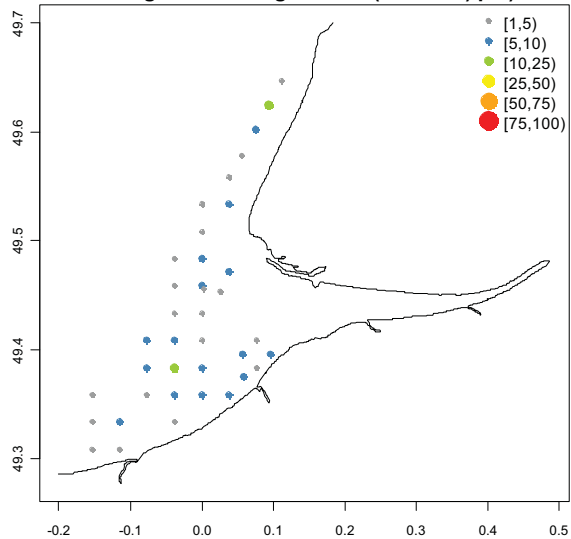
*Cartes de distribution spatiale des cinq classes granulométriques (vases ( $< 63 \mu\text{m}$ ), sables fins ( $[50-200) \mu\text{m}$ ), sables moyens ( $[200-500) \mu\text{m}$ ), sables grossiers ( $[500-2000) \mu\text{m}$ ), graviers ( $> 2000 \mu\text{m}$ )) prises en comptes lors des campagnes du suivi PECTOW, pour les années 1988, 1991, 1996, 2001 et 2006 et sur la base de la grille d'échantillonnage commune à toutes ces années.*

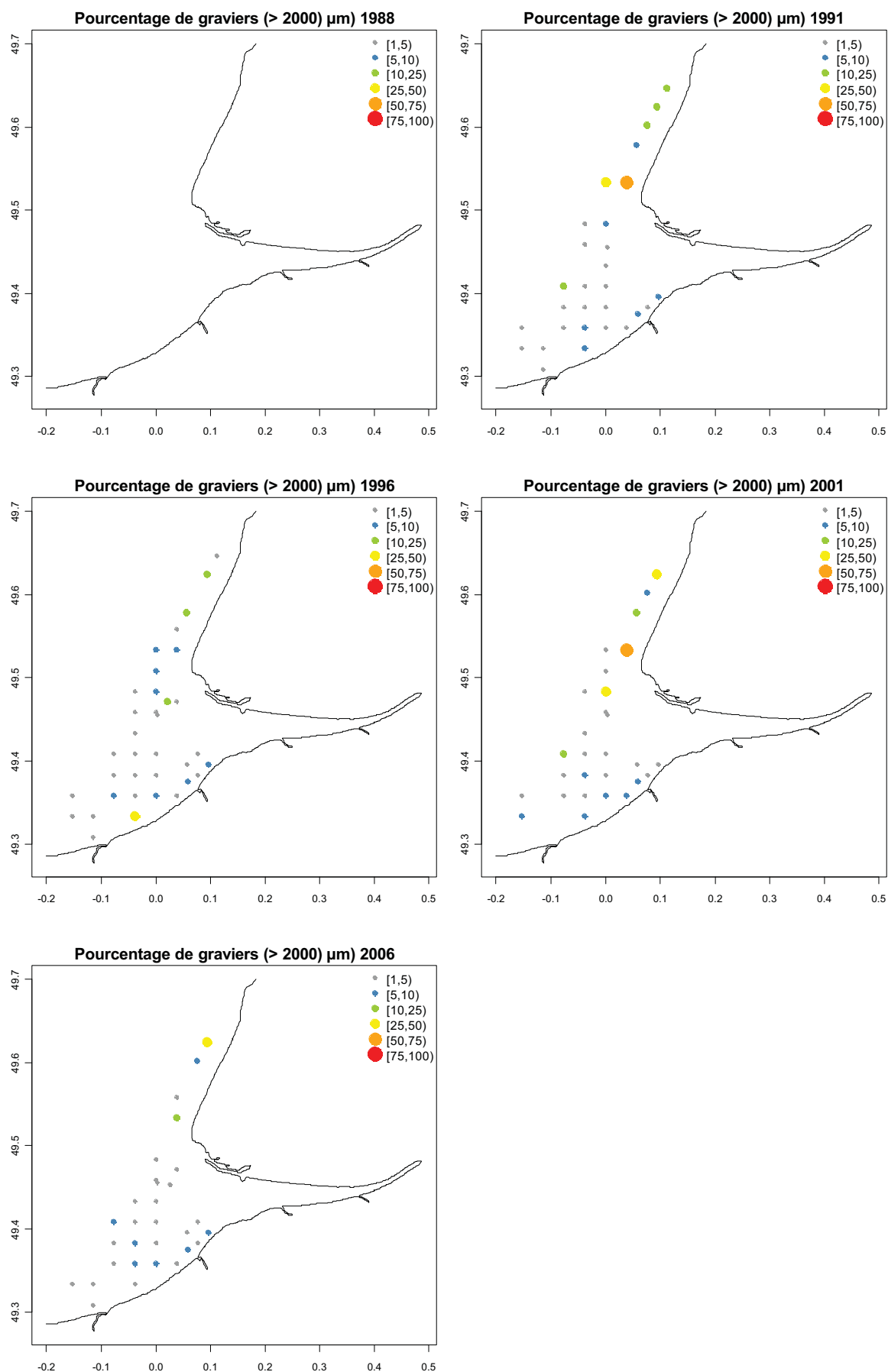






Pourcentage de sables moyens ([200-500]  $\mu\text{m}$ ) 1988Pourcentage de sables moyens ([200-500]  $\mu\text{m}$ ) 1991Pourcentage de sables moyens ([200-500]  $\mu\text{m}$ ) 1996Pourcentage de sables moyens ([200-500]  $\mu\text{m}$ ) 2001Pourcentage de sables moyens ([200-500]  $\mu\text{m}$ ) 2006

Pourcentage de sables grossiers (500-2000  $\mu\text{m}$ ) 1988Pourcentage de sables grossiers (500-2000  $\mu\text{m}$ ) 1991Pourcentage de sables grossiers (500-2000  $\mu\text{m}$ ) 1996Pourcentage de sables grossiers (500-2000  $\mu\text{m}$ ) 2001Pourcentage de sables grossiers (500-2000  $\mu\text{m}$ ) 2006



**Tableau A : Indices de marginalité (OMI : Outlying Mean Index), de tolérance (Tol) et de tolérance résiduelle (RTol), calculés à partir des résultats de l'analyse OMI réalisée sur les données groupées 2008-2009 des campagnes COLMATAGE. Un test de Monte Carlo a été utilisé pour tester la significativité de la marginalité des espèces prises en compte dans l'analyse, les résultats sont dans la colonne (p.value).**

**Tableau B : Indices de marginalité (OMI : Outlying Mean Index), de tolérance (Tol) et de tolérance résiduelle (RTol), calculés à partir des résultats de l'analyse OMI réalisée sur les données groupées 1988-1991-1996-2001-2006 des campagnes PECTOW. Un test de Monte Carlo a été utilisé pour tester la significativité de la marginalité des espèces prises en compte dans l'analyse, les résultats sont dans la colonne (p.value).**

Tableau A (COLMATAGE 2008-2009)

<u>Taxons</u>	<u>OMI</u>	<u>Tol</u>	<u>Rtol</u>	<u>p.value</u>
Abr.a	0.11	1.31	2.58	0.001
Ampe.b	0.15	0.78	2.81	0.006
Ampe.te	0.28	1.06	2.09	0.008
Amph.b	0.23	1.18	2.14	0.001
Ant.v	0.69	0.67	0.75	0.005
Bat.e	5.73	0.66	0.04	0.007
Bat.t	2.21	0.61	0.22	0.001
Cau.a	0.31	0.94	2.09	0.001
Cor.g	0.84	1.42	2.33	0.001
Ech.c	0.6	1.74	0.86	0.001
Ens.d	0.4	1.86	2.85	0.006
Ens.m	1.1	2.82	1.86	0.013
Eri.p	0.97	0.76	1.69	0.008
Eum.b	0.17	0.95	2.49	0.002
Eun.l	0.23	1.09	1.61	0.008
Gen.Li	0.5	1.85	1.36	0.004
Gen.Lu	0.32	0.91	1.77	0.006
Gen.Pr	0.48	1.68	1.95	0.002
Gly.n	0.17	1.1	2.38	0.003
Lag.k	0.12	1.29	2.48	0.004
Lut.a	0.75	0.72	2.31	0.002
Mag.f	0.23	0.35	2.73	0.002
Mag.j	0.18	0.89	2.84	0.001
Med.f	0.57	0.96	1.75	0.001
Meg.a	1.82	0.97	0.64	0.001
Meln.p	0.75	0.87	1.73	0.002
Melt.p	1.64	2.58	1.75	0.005
Nep.a	0.43	0.77	3.23	0.011
Nep.c	0.2	1.45	1.58	0.001
Not.l	0.33	1.06	2.16	0.004
Nuc.n	0.27	1.77	1.35	0.009
Owe.f	0.24	1.37	2.86	0.001
Par.t	0.46	0.9	2.36	0.001
Per.l	0.89	1.2	1.1	0.001
Pet.p	4.99	2.37	0.65	0.002
Phy.mu	0.24	1.44	2.83	0.002
Phy.r	0.64	1.4	1.45	0.017
Poe.s	1.02	0.99	0.71	0.001
Sig.m	0.52	0.47	2.4	0.003
Sth.b	0.56	1.83	2.29	0.001
Thi.s	4.99	0.33	0.05	0.002
Thy.f	2.18	3.31	1.66	0.002
Ven.s	2.48	4.05	1.85	0.002

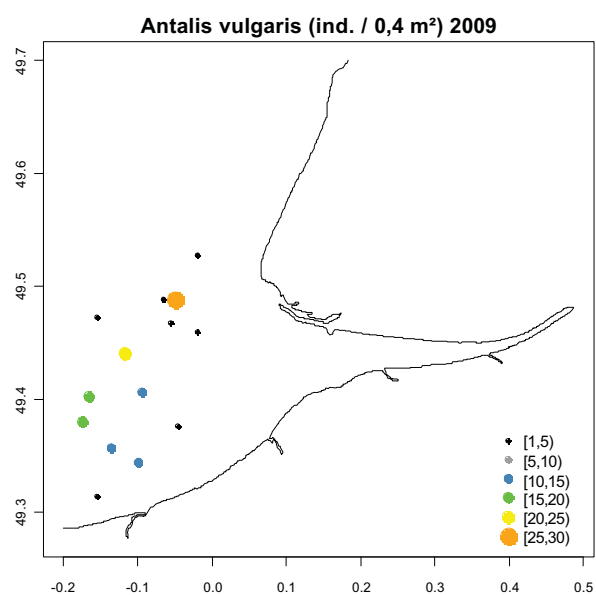
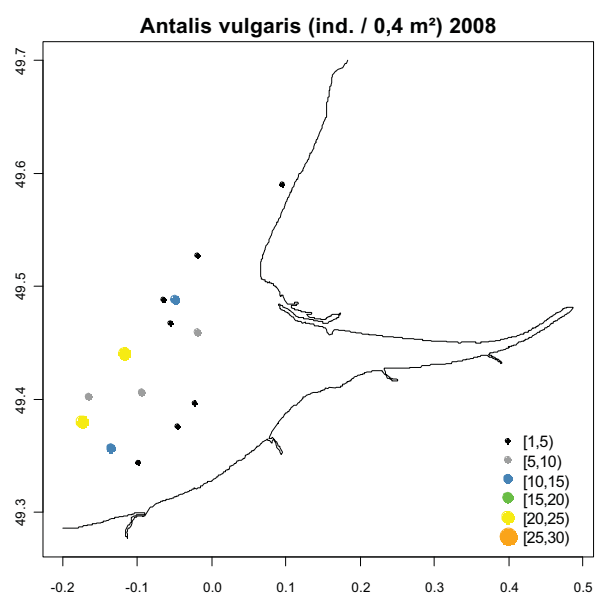
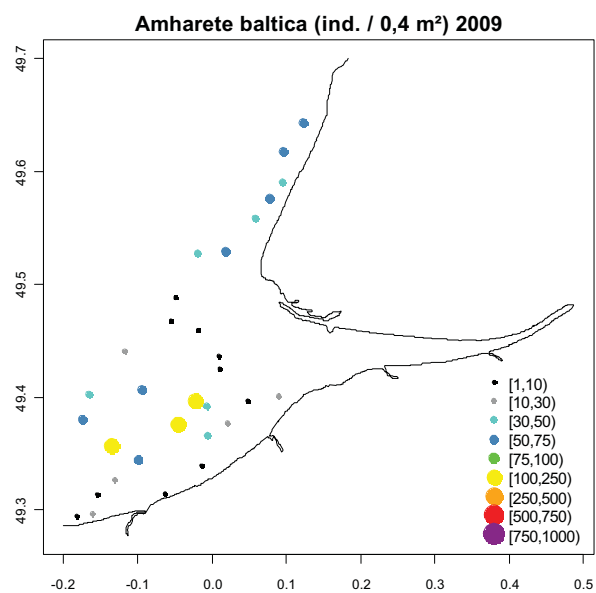
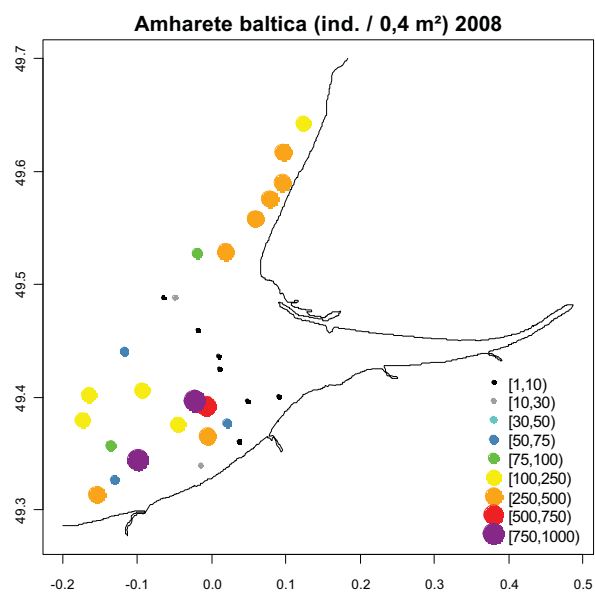
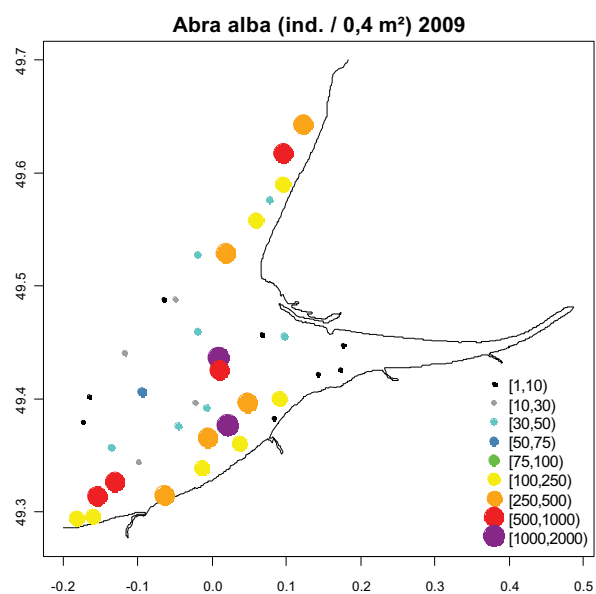
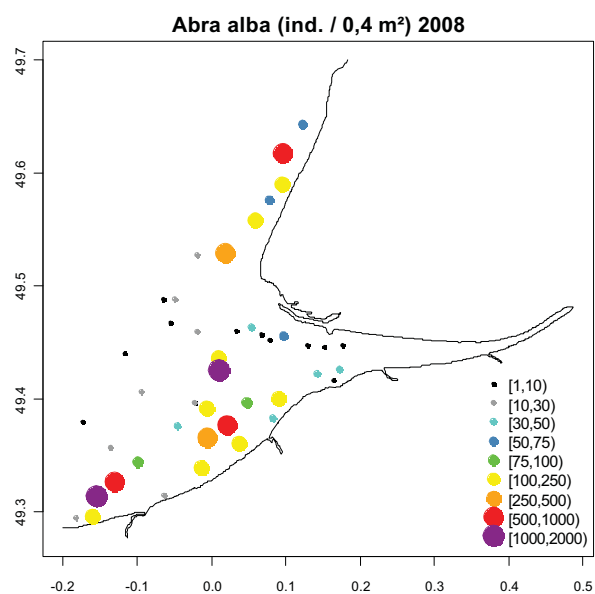


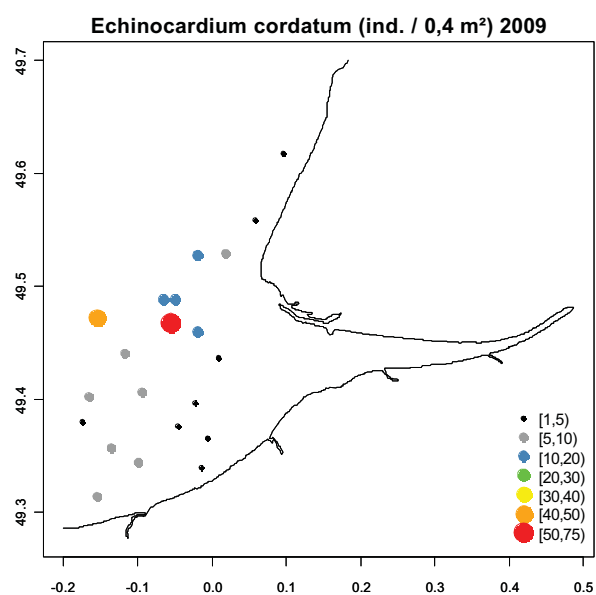
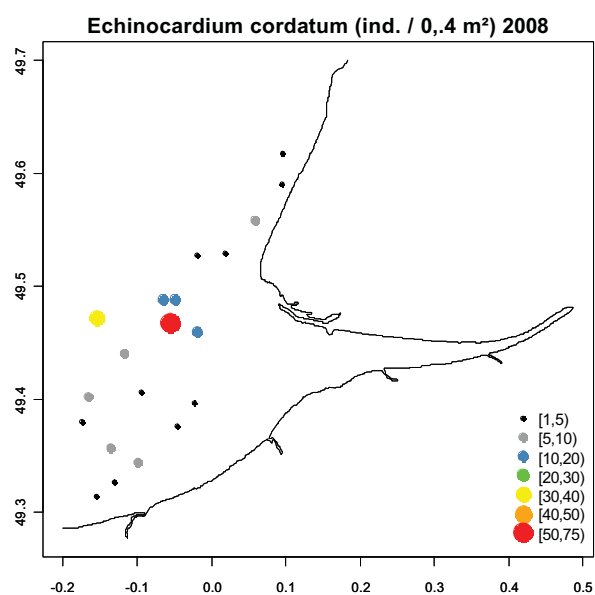
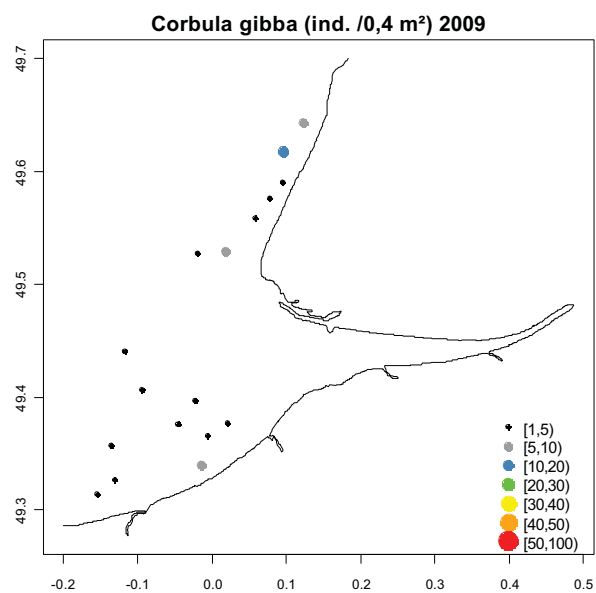
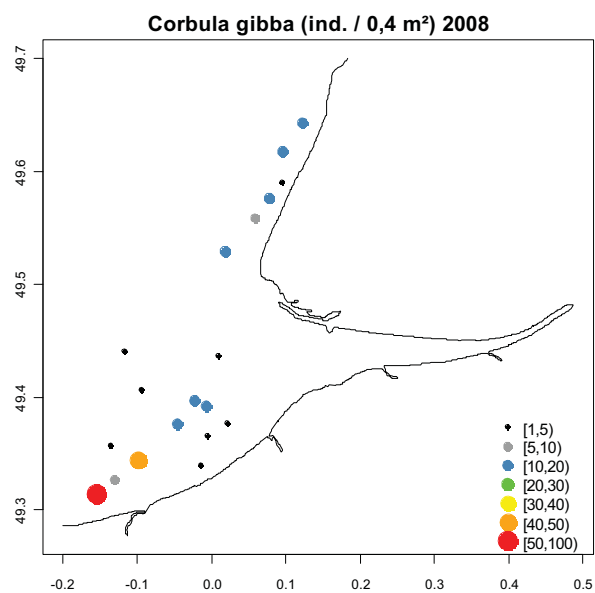
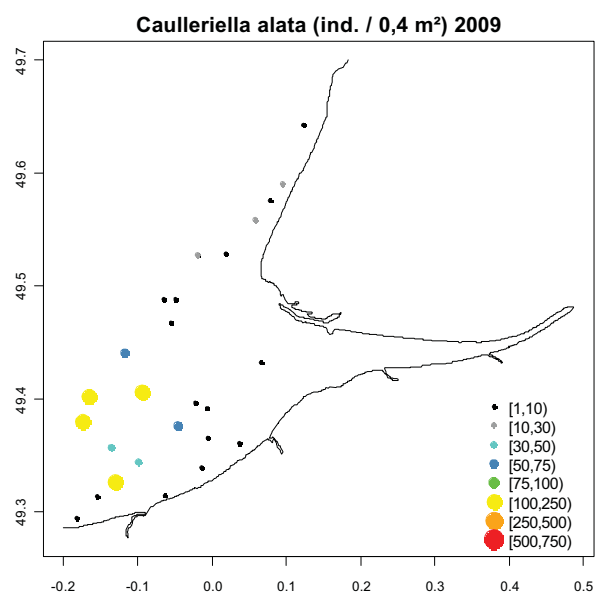
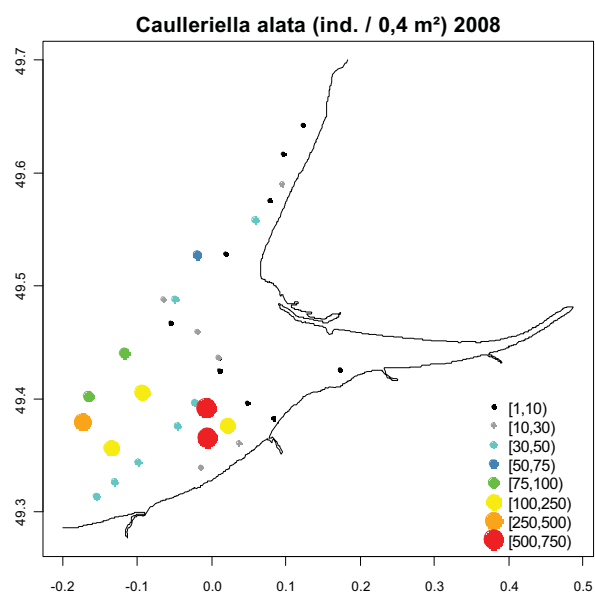
Tableau B (PECTOW 1988-1991-1996-2001-2006)

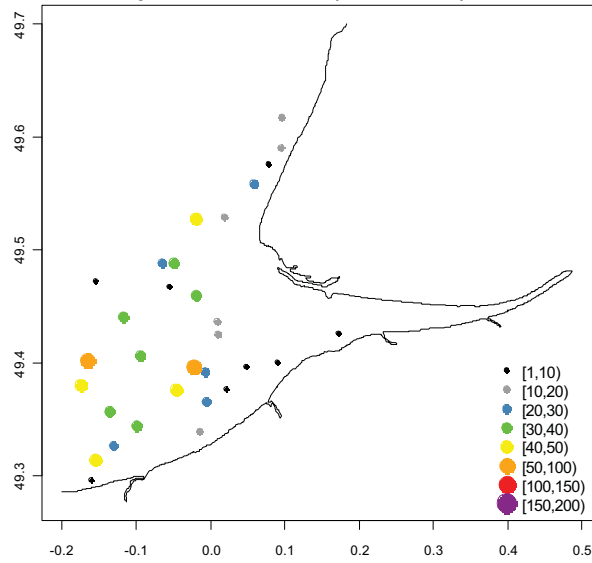
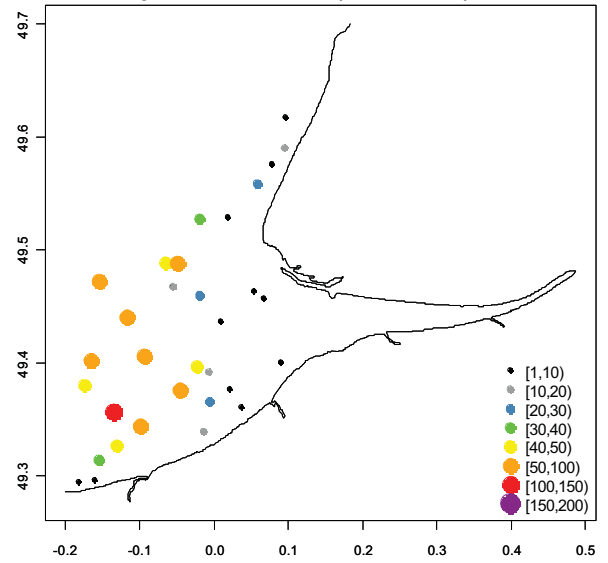
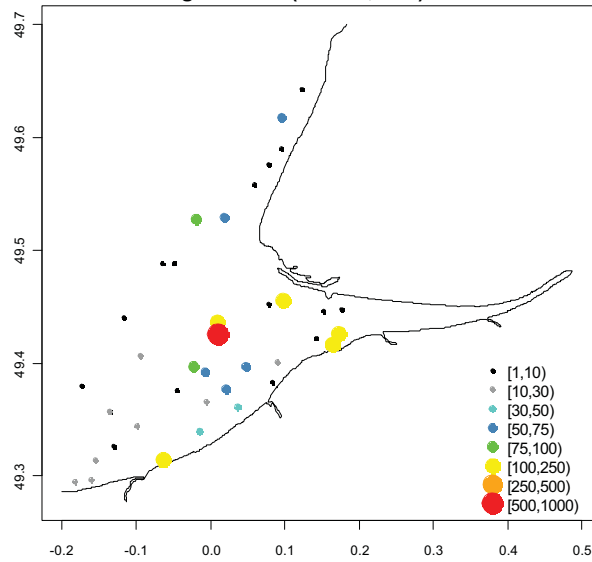
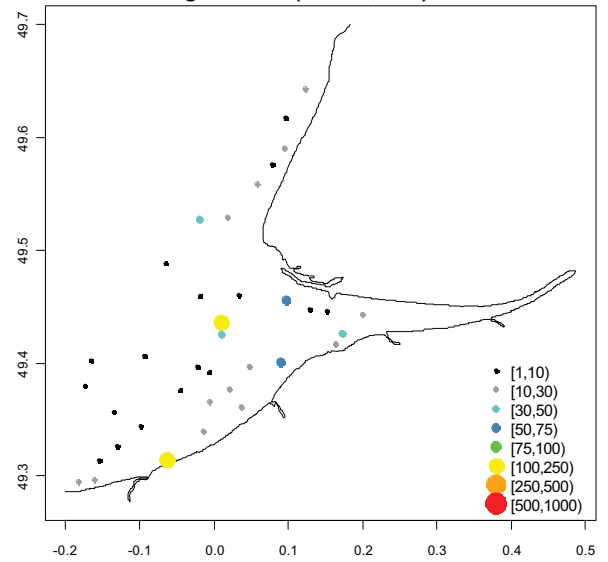
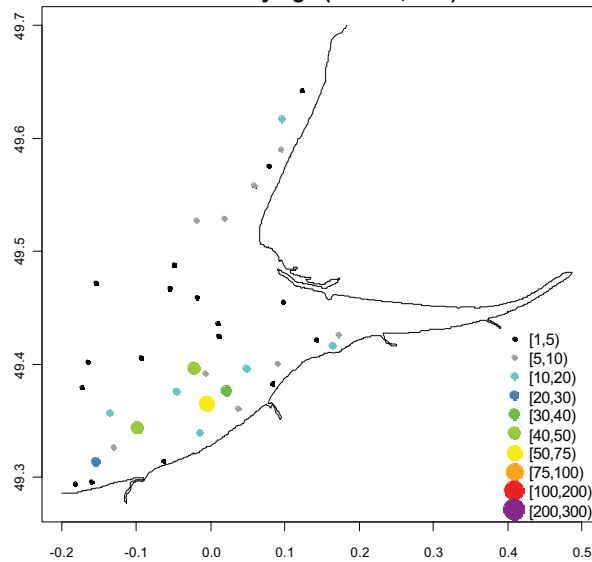
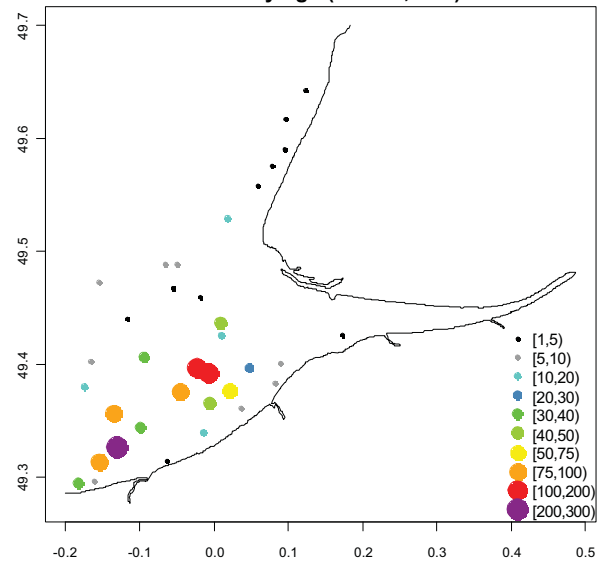
<u>Taxons</u>	<u>OMI</u>	<u>Tol</u>	<u>Rtol</u>	<u>p.values</u>
Abr.a	0.11	1.62	1.86	0.005
Acr.b	0.07	0.69	3.12	0.002
Amph.b	0.08	1.55	2.54	0.029
Ant.v	0.55	0.83	1.05	0.05
Ast.r	0.53	3.40	2.18	0.006
Cor.g	0.48	2.94	1.64	0.001
Ens.e	0.44	0.92	1.80	0.002
Ens.m	0.93	1.62	1.82	0.006
Eun.l	0.19	1.74	3.06	0.007
Gat.c	0.70	1.55	2.76	0.037
Gen.Ca	0.35	0.35	3.17	0.001
Gen.Ch	0.28	0.87	1.52	0.002
Gen.Eum	0.31	1.13	2.32	0.018
Gen.Eus	0.04	1.44	2.49	0.029
Gen.Gl	0.44	2.02	2.09	0.031
Gen.Lum	0.48	2.12	1.91	0.001
Gen.Lut	0.16	1.77	1.93	0.034
Gen.Ma	0.41	0.65	2.01	0.001
Gen.My	1.52	3.61	1.01	0.001
Gen.Ph	0.11	1.57	2.62	0.012
Kur.b	0.16	1.71	2.00	0.002
Lag.k	0.03	1.53	2.02	0.058
Mac.s	0.28	0.68	2.66	0.024
Meln.p	2.64	2.11	0.66	0.001
Nep.c	2.08	1.70	1.22	0.001
Nuc.n	0.31	2.02	2.15	0.001
Owe.f	0.07	1.18	2.55	0.001
Pan.i	0.68	0.49	2.39	0.014
Sco.a	0.22	0.48	1.94	0.014
Sig.m	0.57	0.62	1.37	0.001
Spi.b	0.79	0.62	0.99	0.001
Spi.s	0.34	1.62	1.84	0.036
Sth.b	0.30	1.69	2.70	0.001
Tel.f	0.24	0.86	1.80	0.004
Thi.s	1.23	0.97	1.36	0.046
Tub.p	0.12	1.80	2.87	0.019
Ven.s	2.71	5.04	7.64	0.024

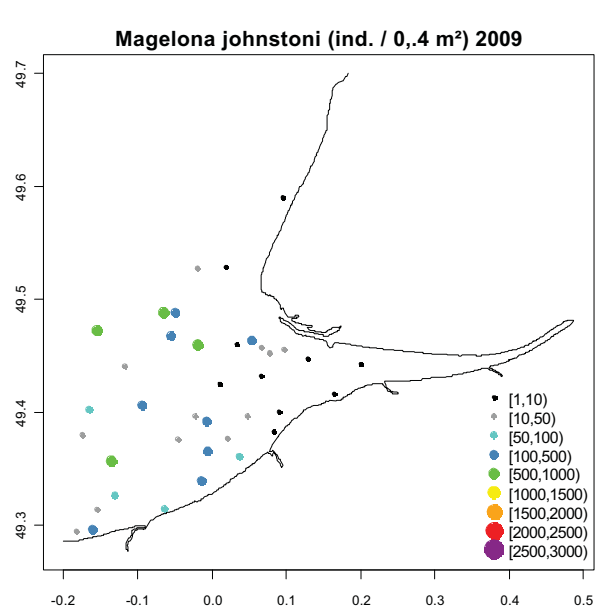
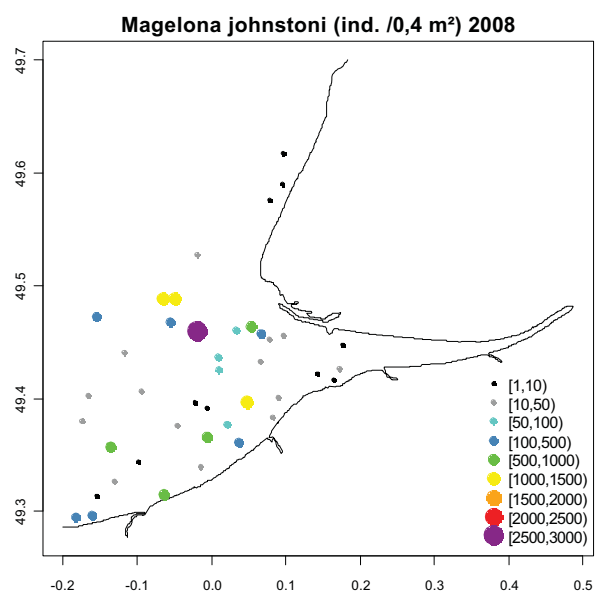
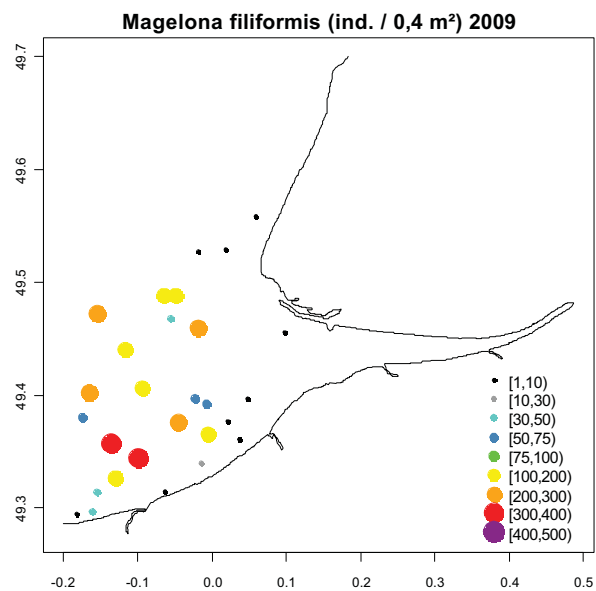
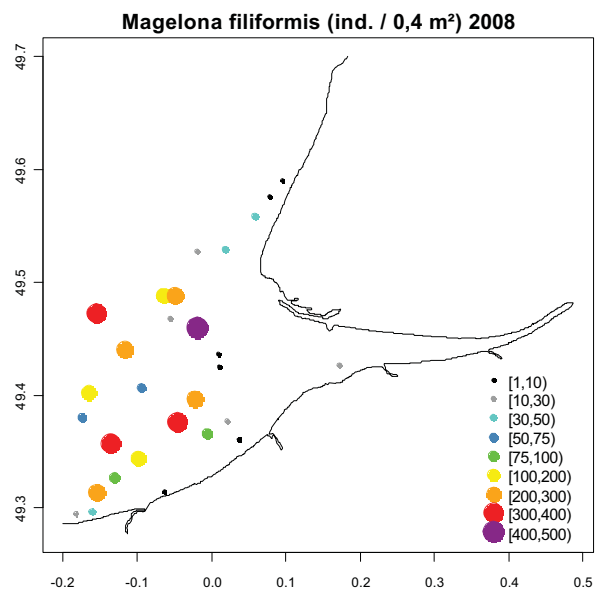
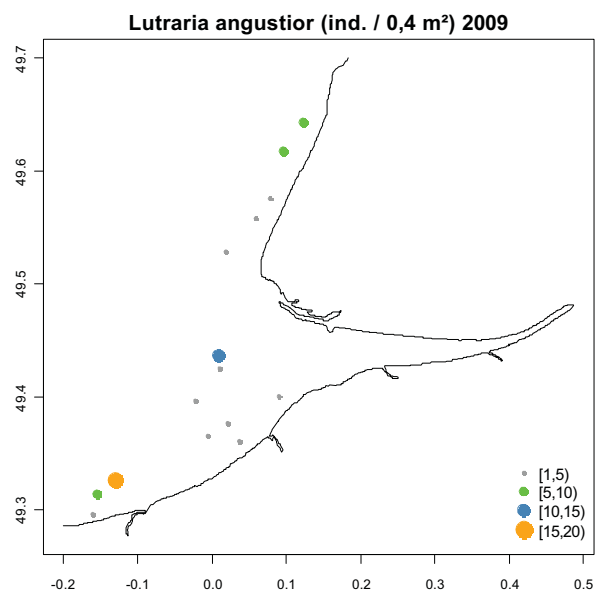
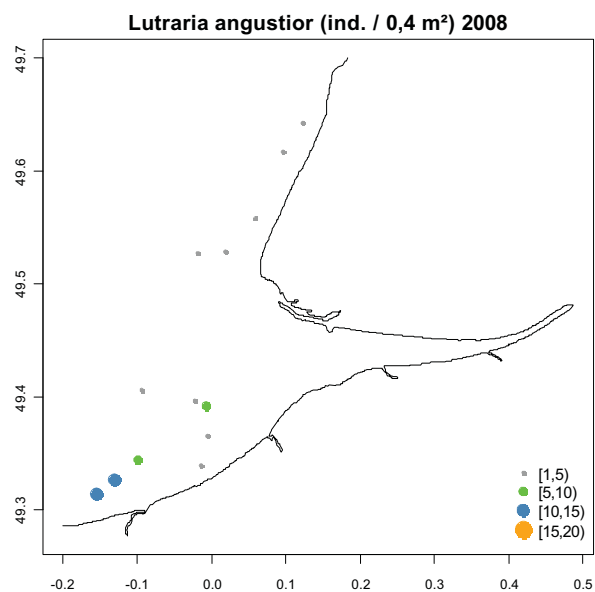
*Cartes de distribution spatiale des abondances (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) de 22 espèces rencontrées lors des campagnes d'échantillonnage COLMATAGE en septembre 2008 et 2009, sur la base de la grille d'échantillonnage commune aux deux années.*

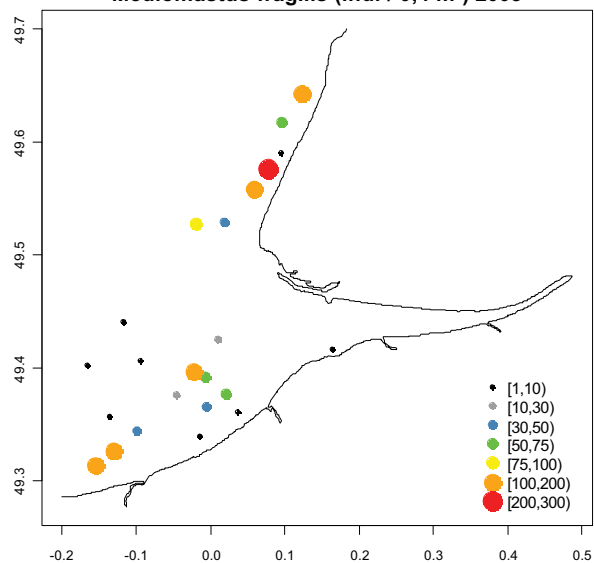
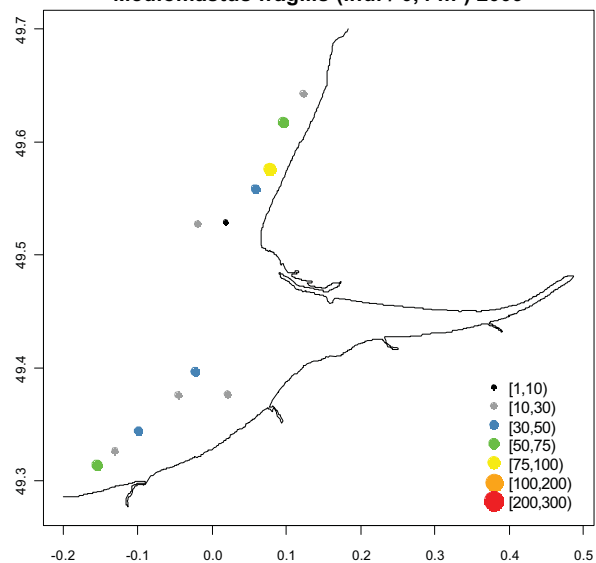
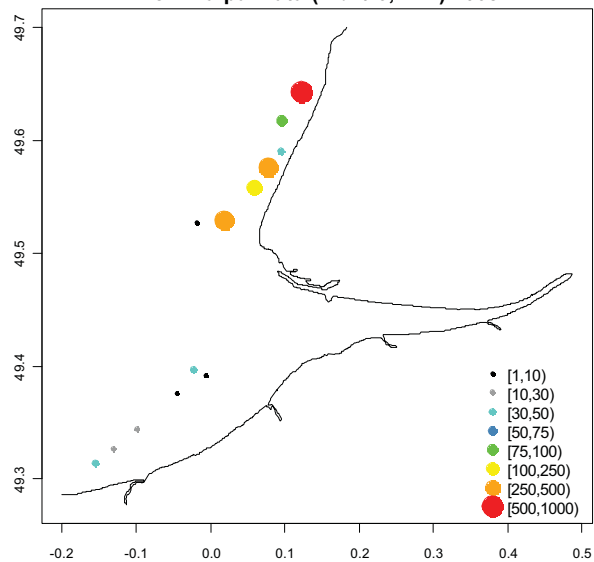
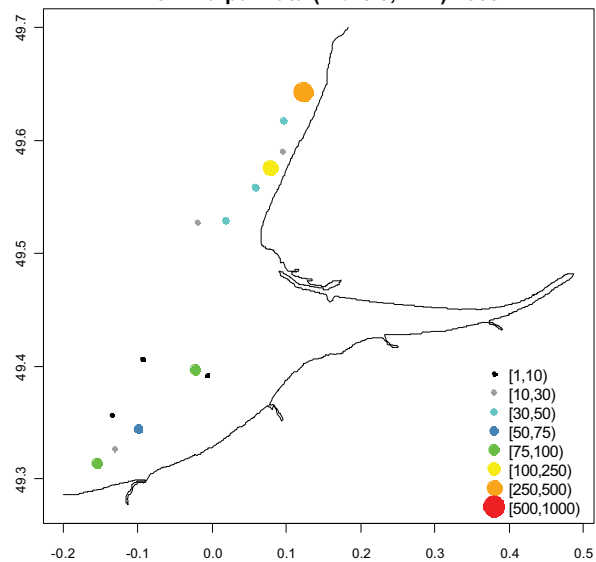
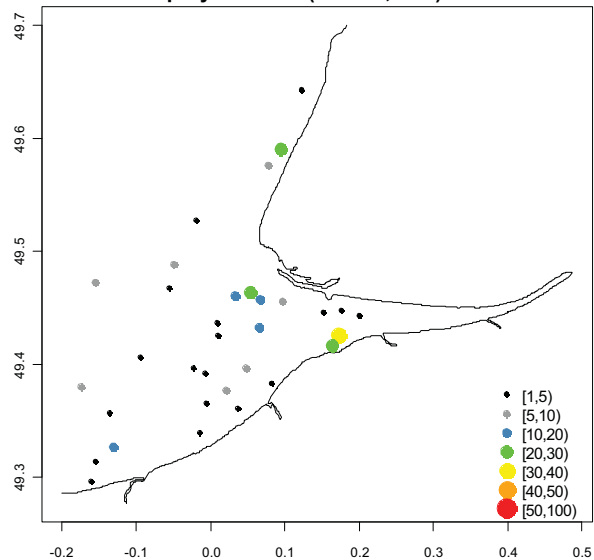
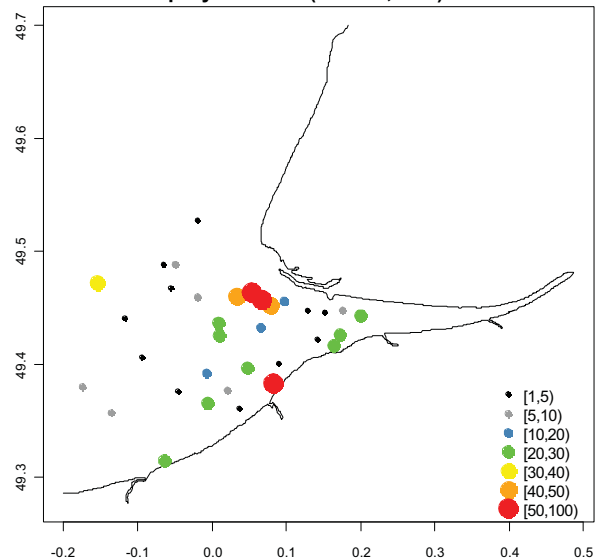
*Les cartes sont triées par ordre alphabétique du nom des espèces.*



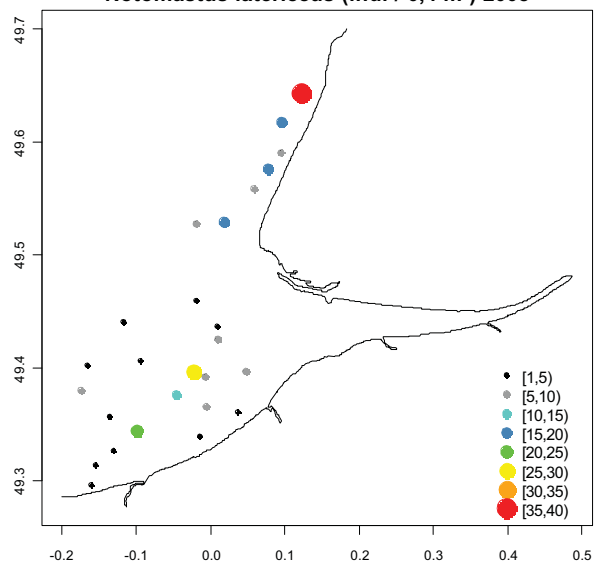
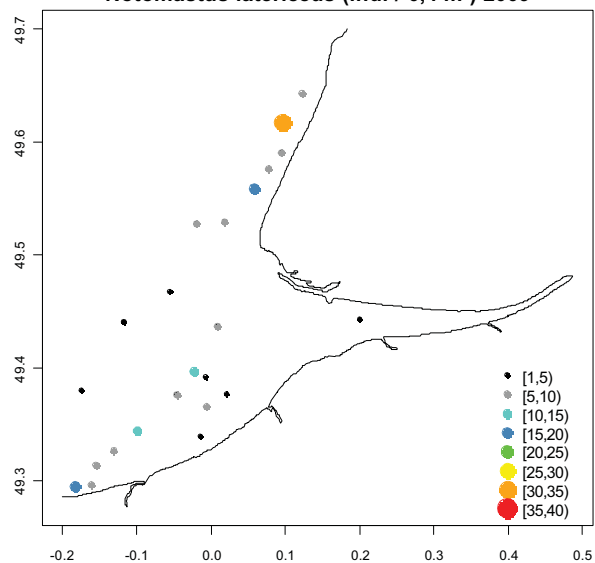
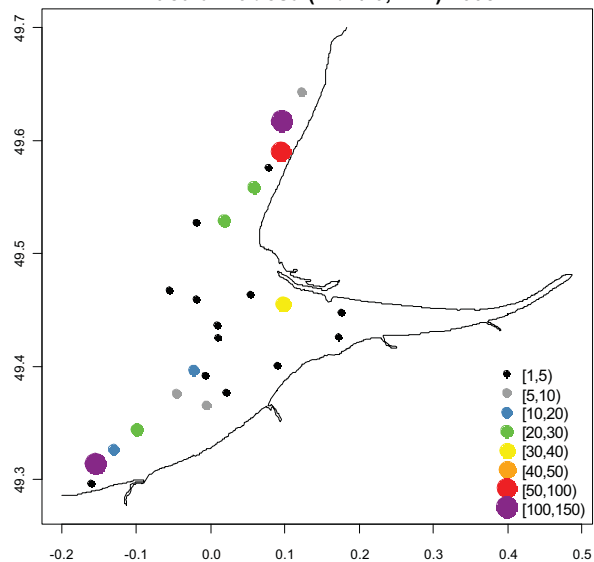
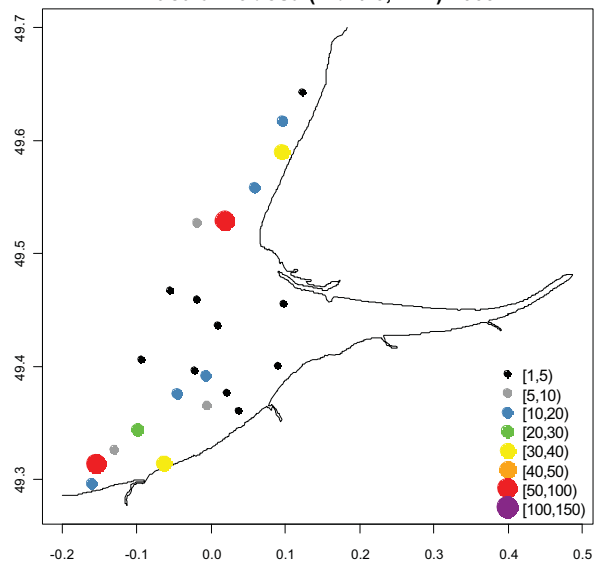
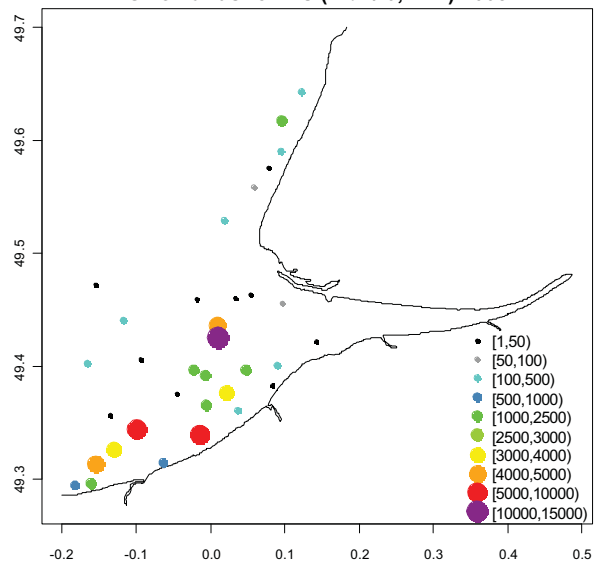
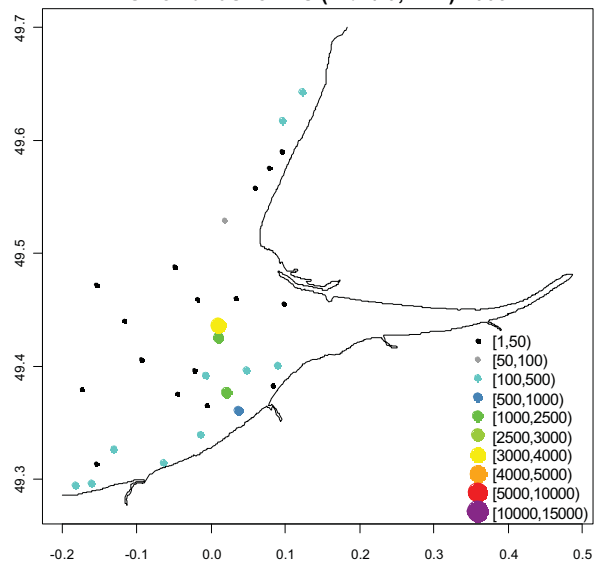


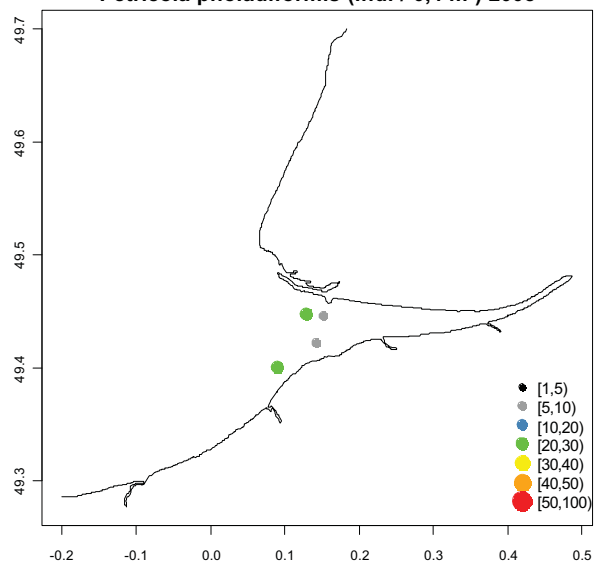
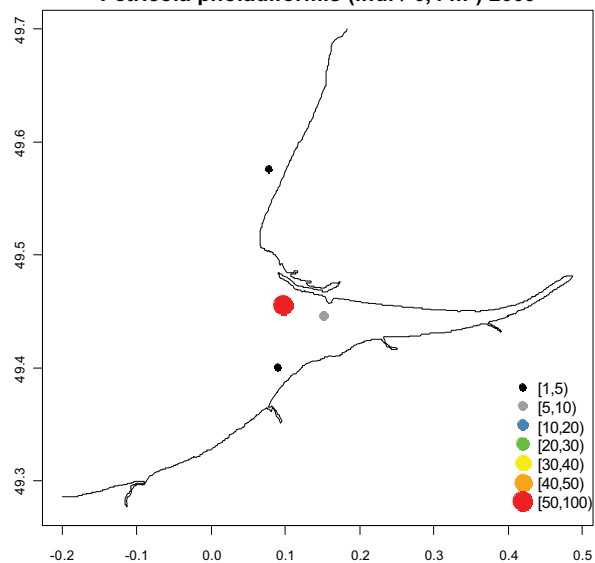
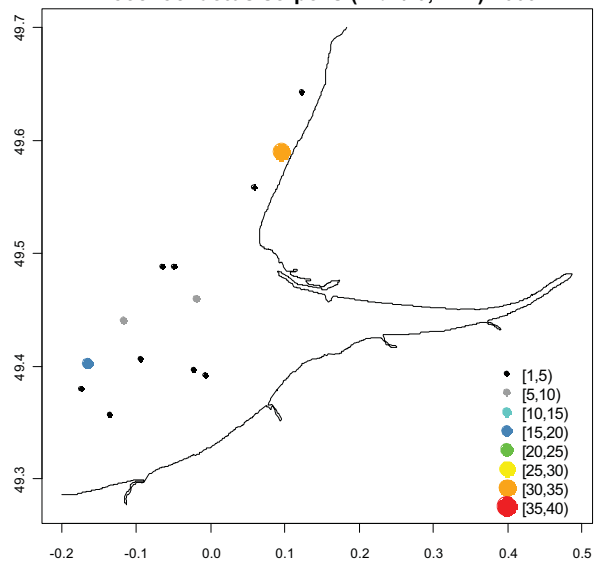
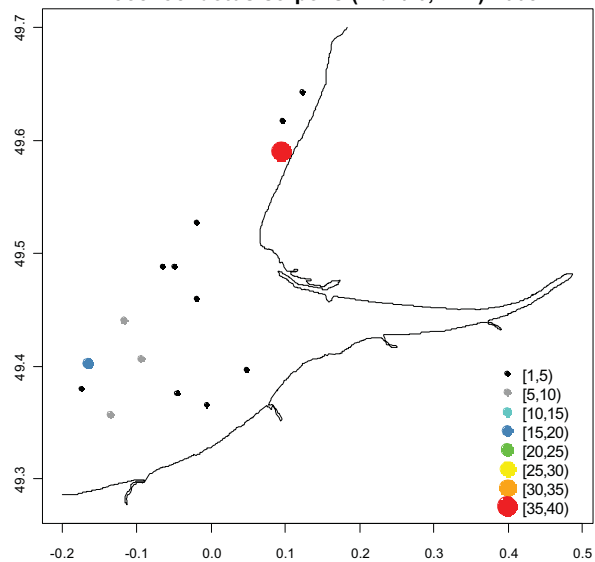
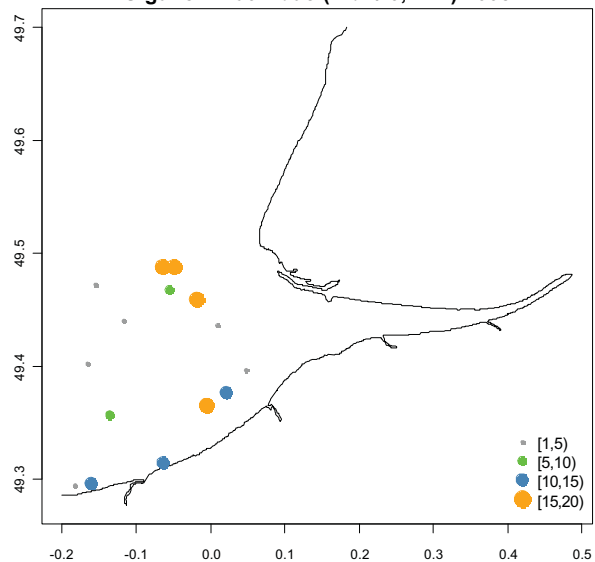
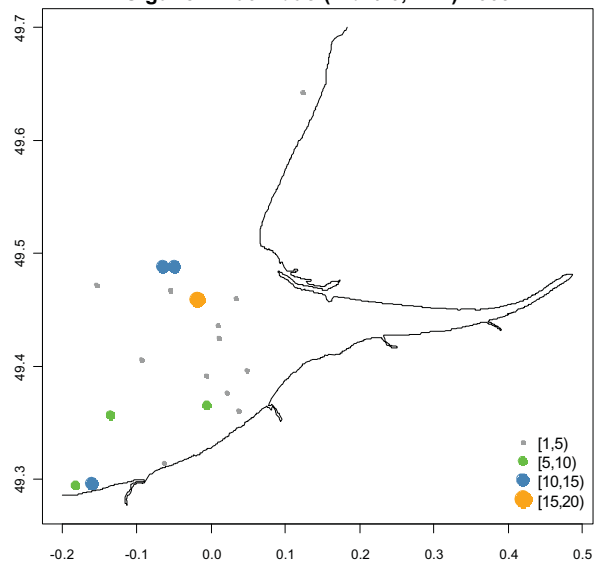
Glycine nordmanni (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2008Glycine nordmanni (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2009Lagis koreni (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2008Lagis koreni (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2009Lanice conchylega (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2008Lanice conchylega (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2009

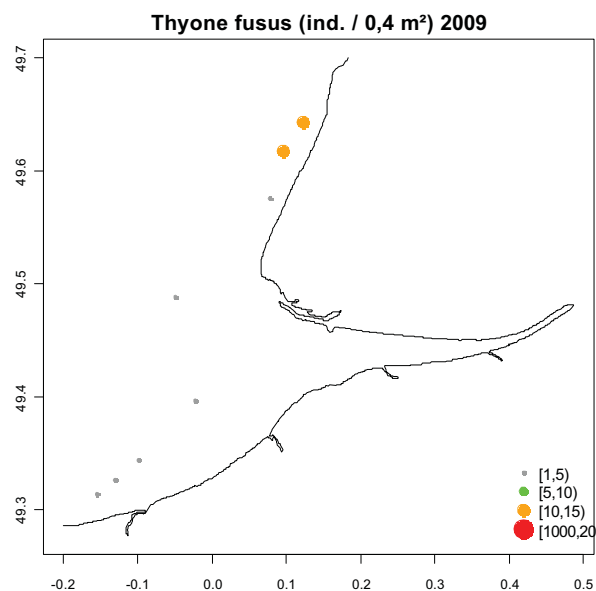
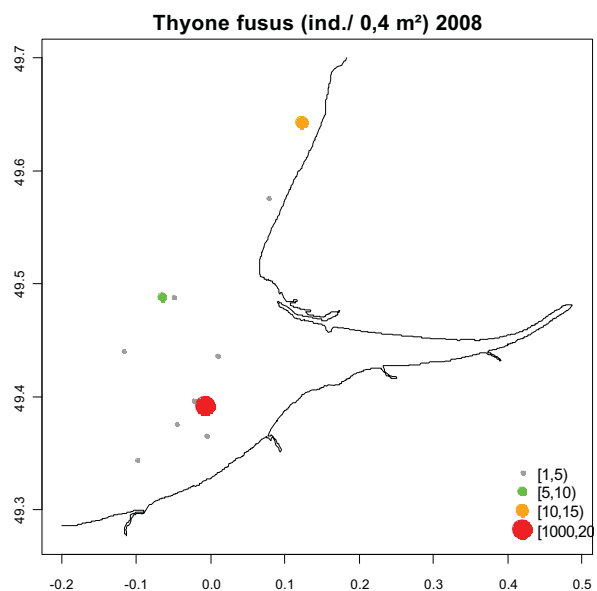
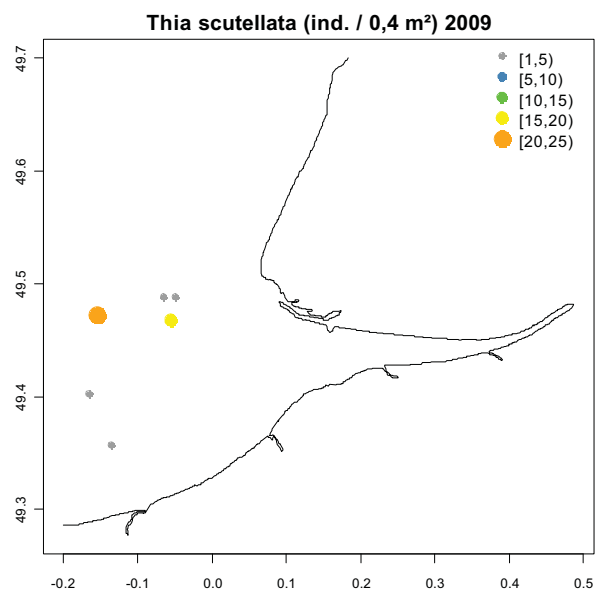
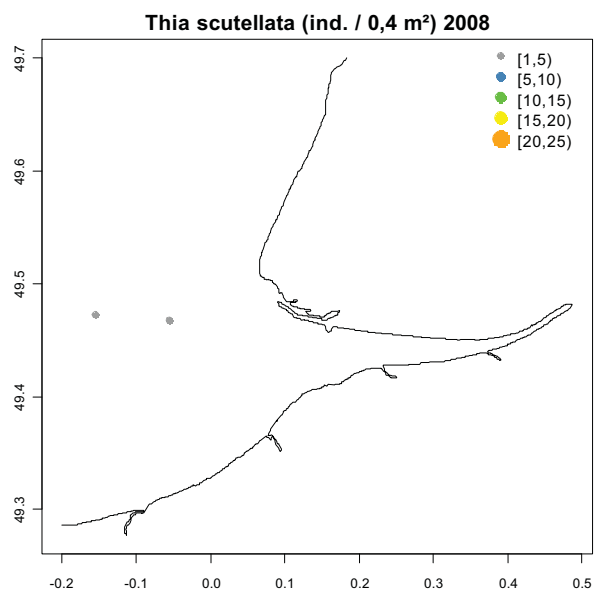


**Mediomastus fragilis (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2008****Mediomastus fragilis (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2009****Melinna palmata (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2008****Melinna palmata (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2009****Nephtys cirrosa (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2008****Nephtys cirrosa (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2009**



**Notomastus latericeus (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2008****Notomastus latericeus (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2009****Nucula nitidosa (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2008****Nucula nitidosa (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2009****Owenia fusiformis (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2008****Owenia fusiformis (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2009**

**Petricola pholadiformis (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2008****Petricola pholadiformis (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2009****Poecilochaetus serpens (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2009****Poecilochaetus serpens (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2008****Sigalion mathildae (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2008****Sigalion mathildae (ind. / 0,4 m<sup>2</sup>) 2009**



11/A:

*Cartes de distribution spatiale des valeurs de richesse spécifique (esp. / 1 m<sup>2</sup>) rencontrées lors des campagnes d'échantillonnage du suivi PECTOW en mars 1988, 1991, 1996, 2001 et 2006, sur la base de la grille d'échantillonnage commune à toutes ces années.*

11/B:

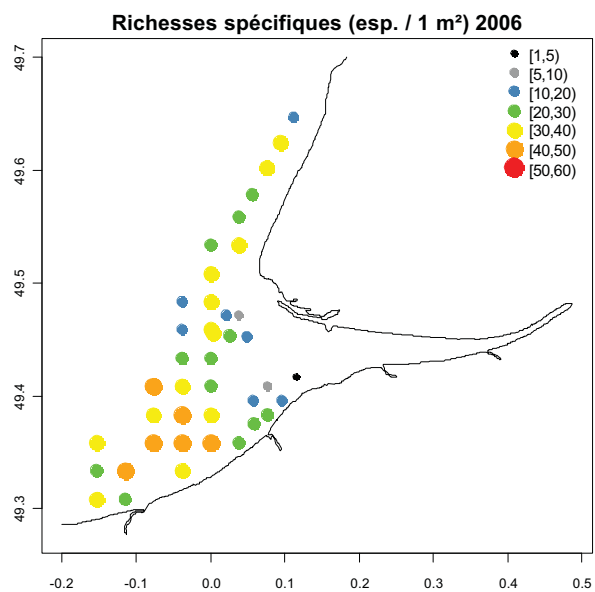
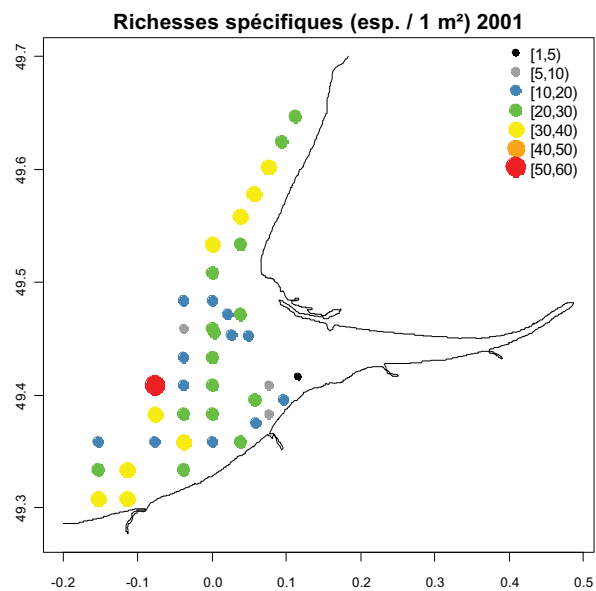
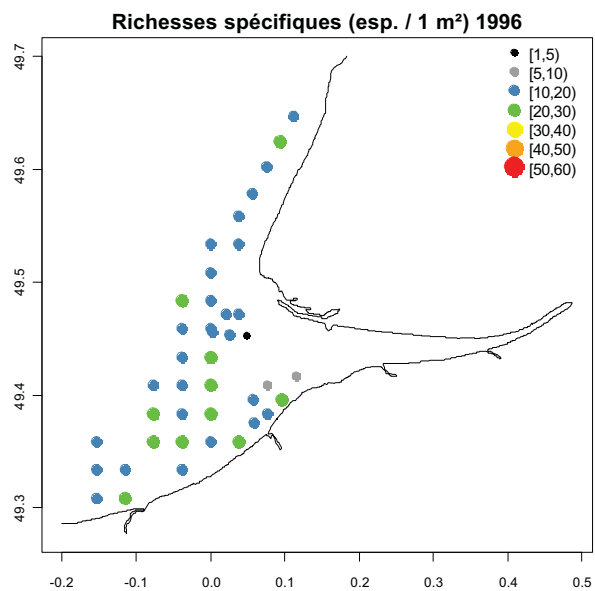
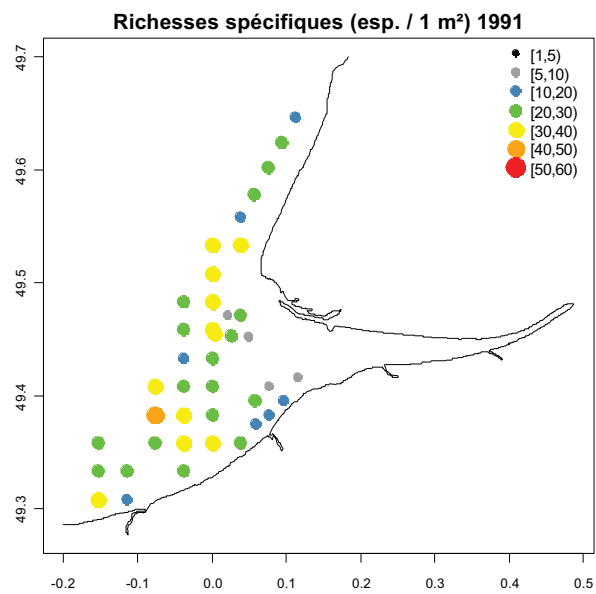
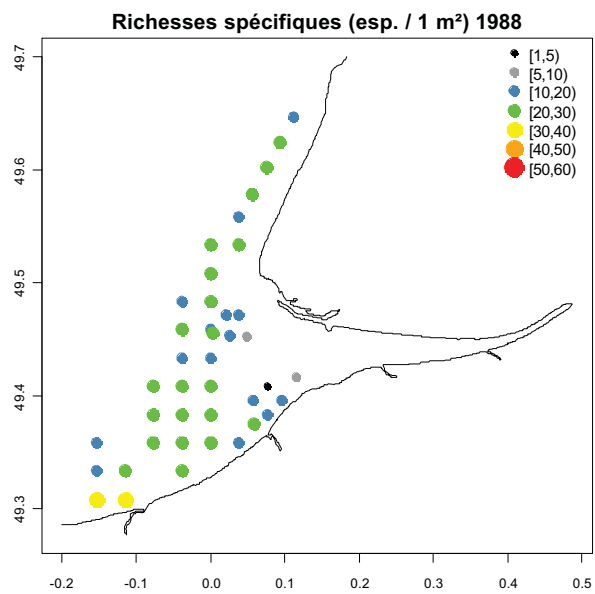
*Cartes de distribution spatiale des valeurs d'abondance totale (ind. / 1 m<sup>2</sup>) rencontrées lors des campagnes d'échantillonnage du suivi PECTOW en mars 1988, 1991, 1996, 2001 et 2006, sur la base de la grille d'échantillonnage commune à toutes ces années.*

11/C:

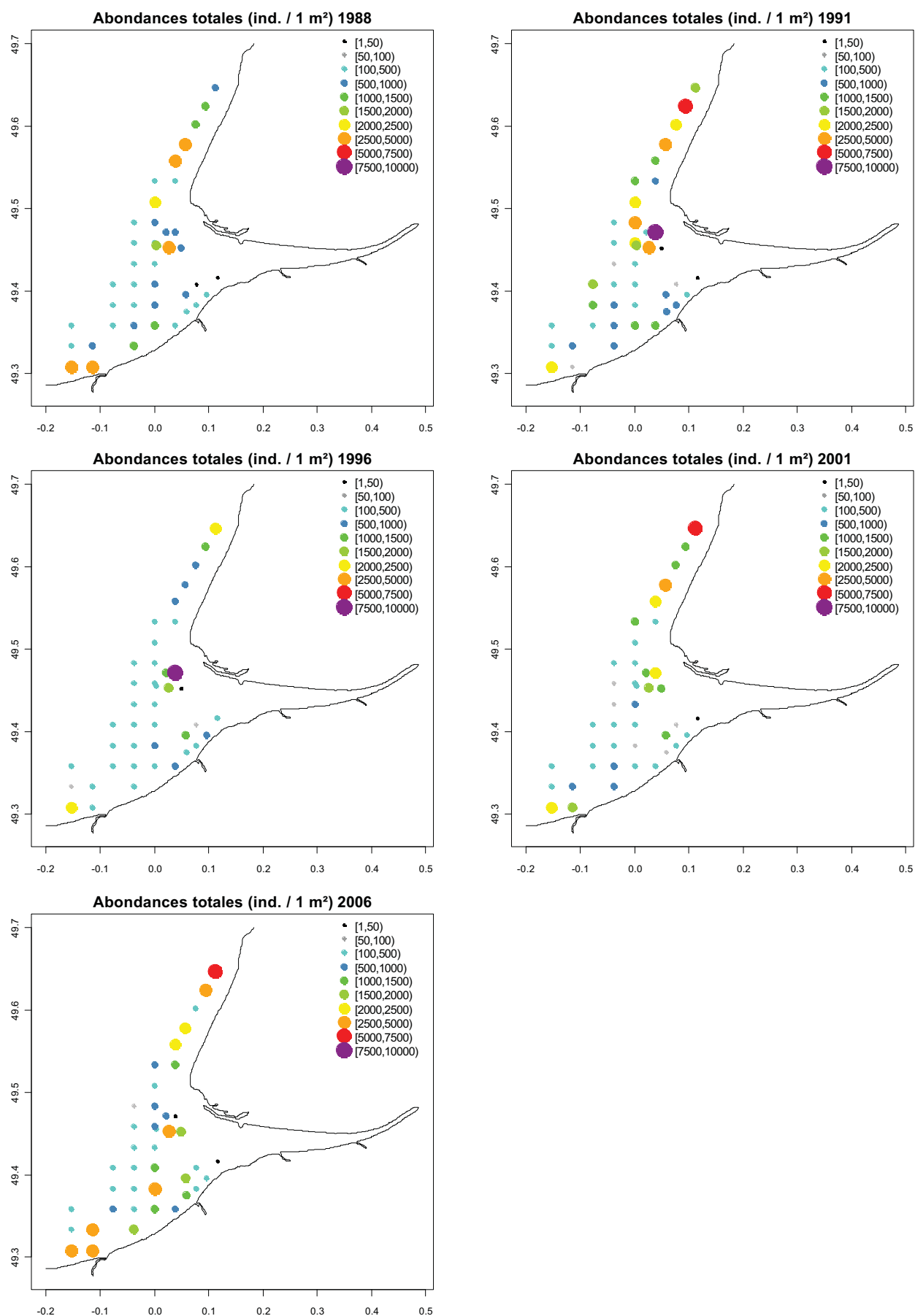
*Cartes de distribution spatiale des abondances (ind. / 1 m<sup>2</sup>) de quelques espèces rencontrées lors des campagnes d'échantillonnage du suivi PECTOW en mars 1988, 1991, 1996, 2001 et 2006, sur la base de la grille d'échantillonnage commune à toutes ces années.*

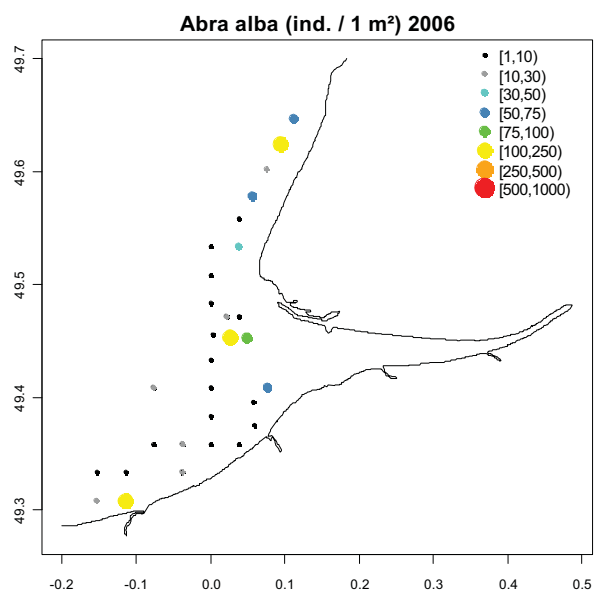
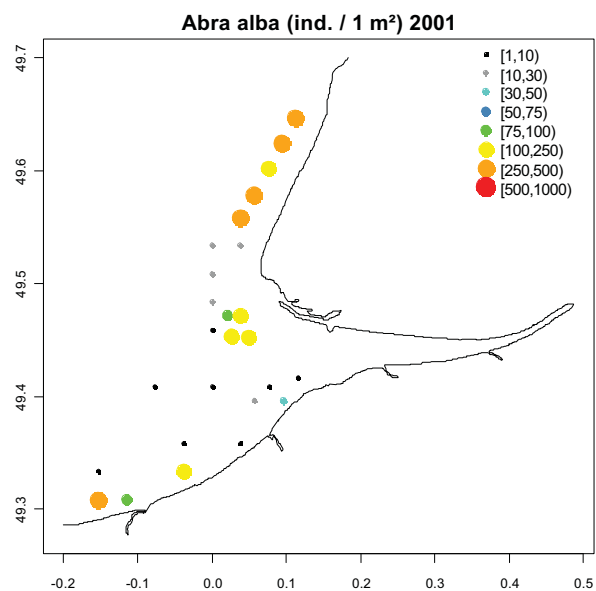
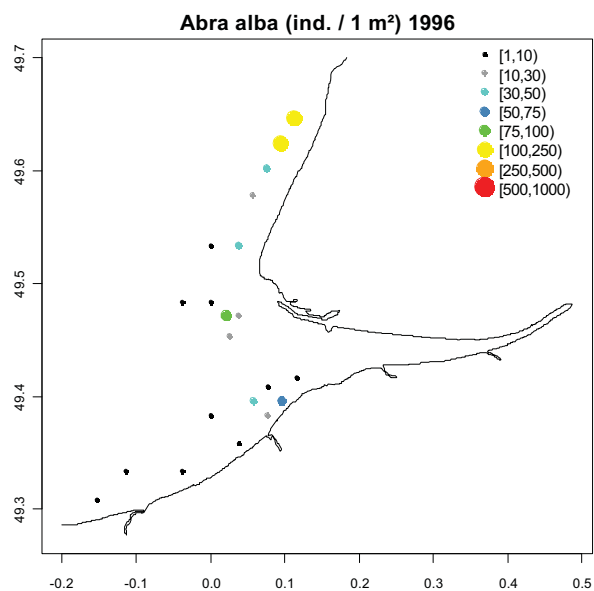
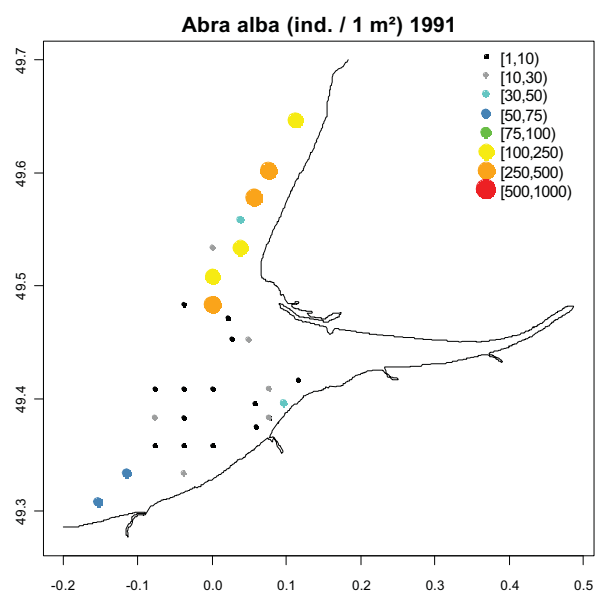
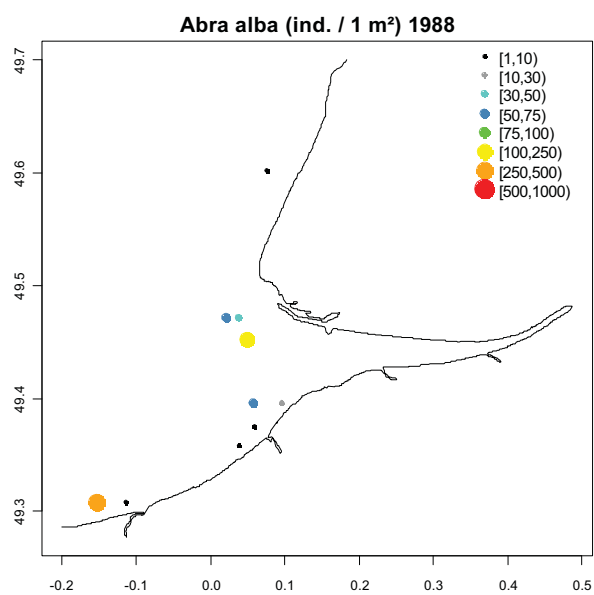
*Les cartes sont triées par ordre alphabétique du nom des espèces.*

A

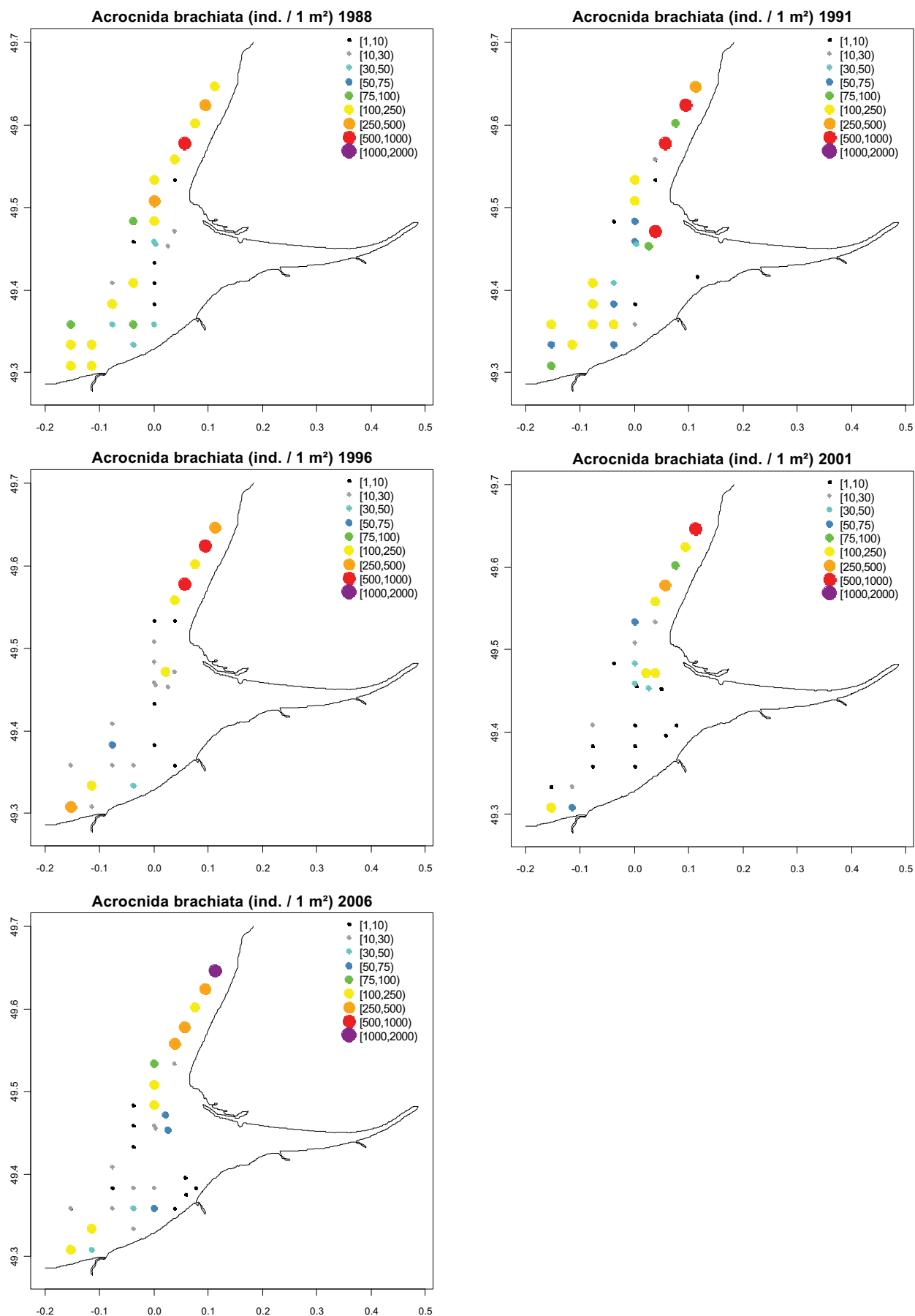


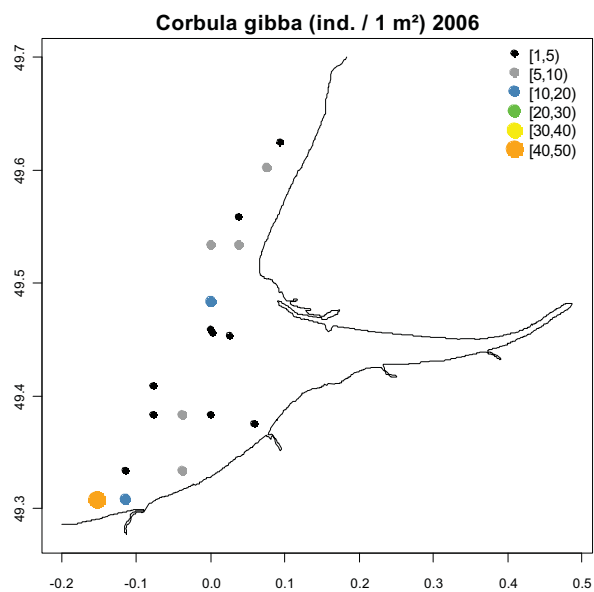
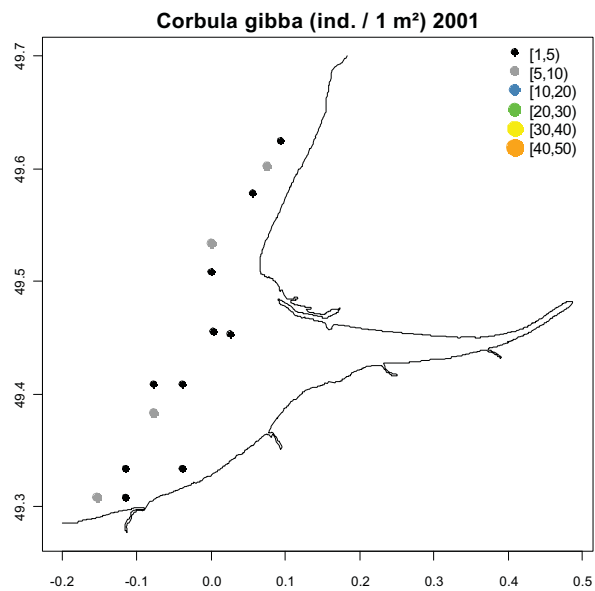
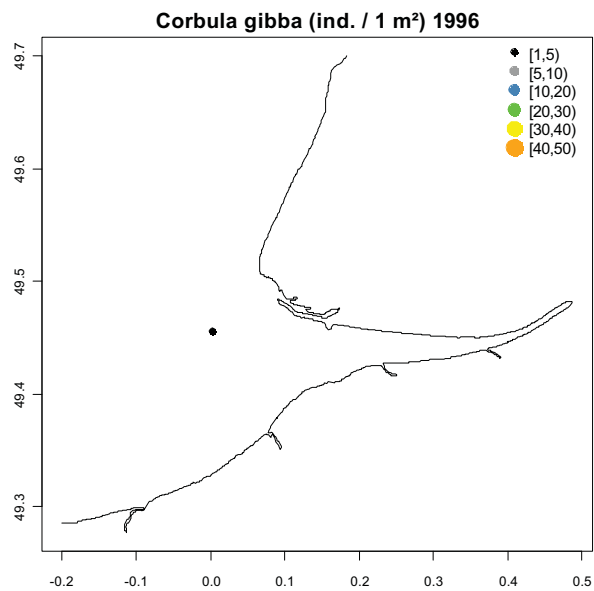
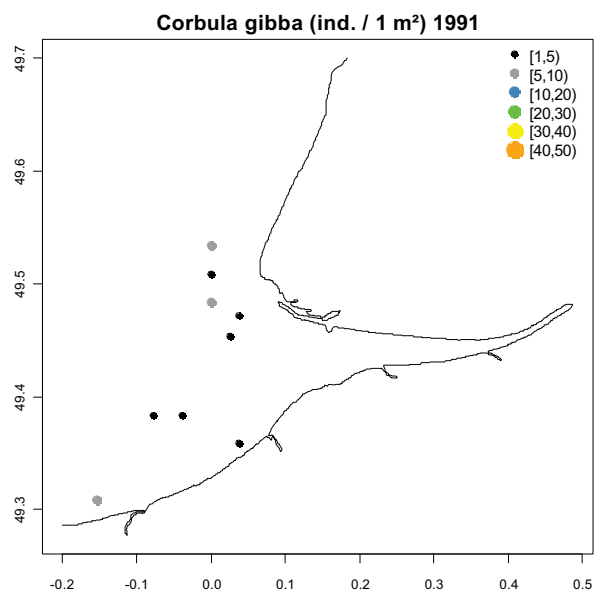
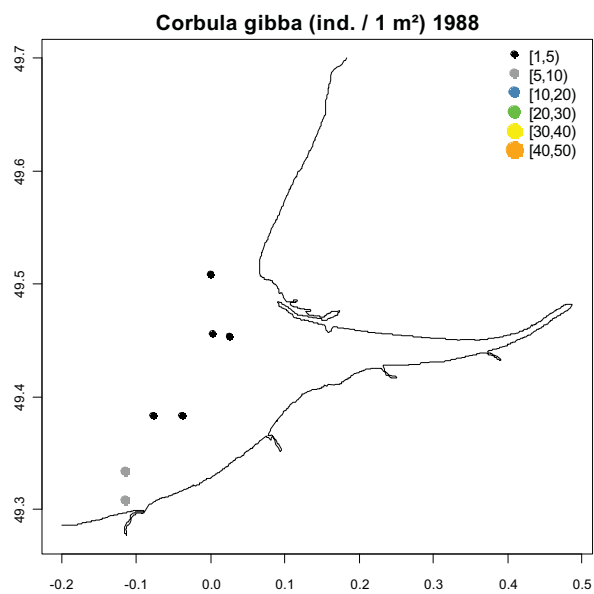
B

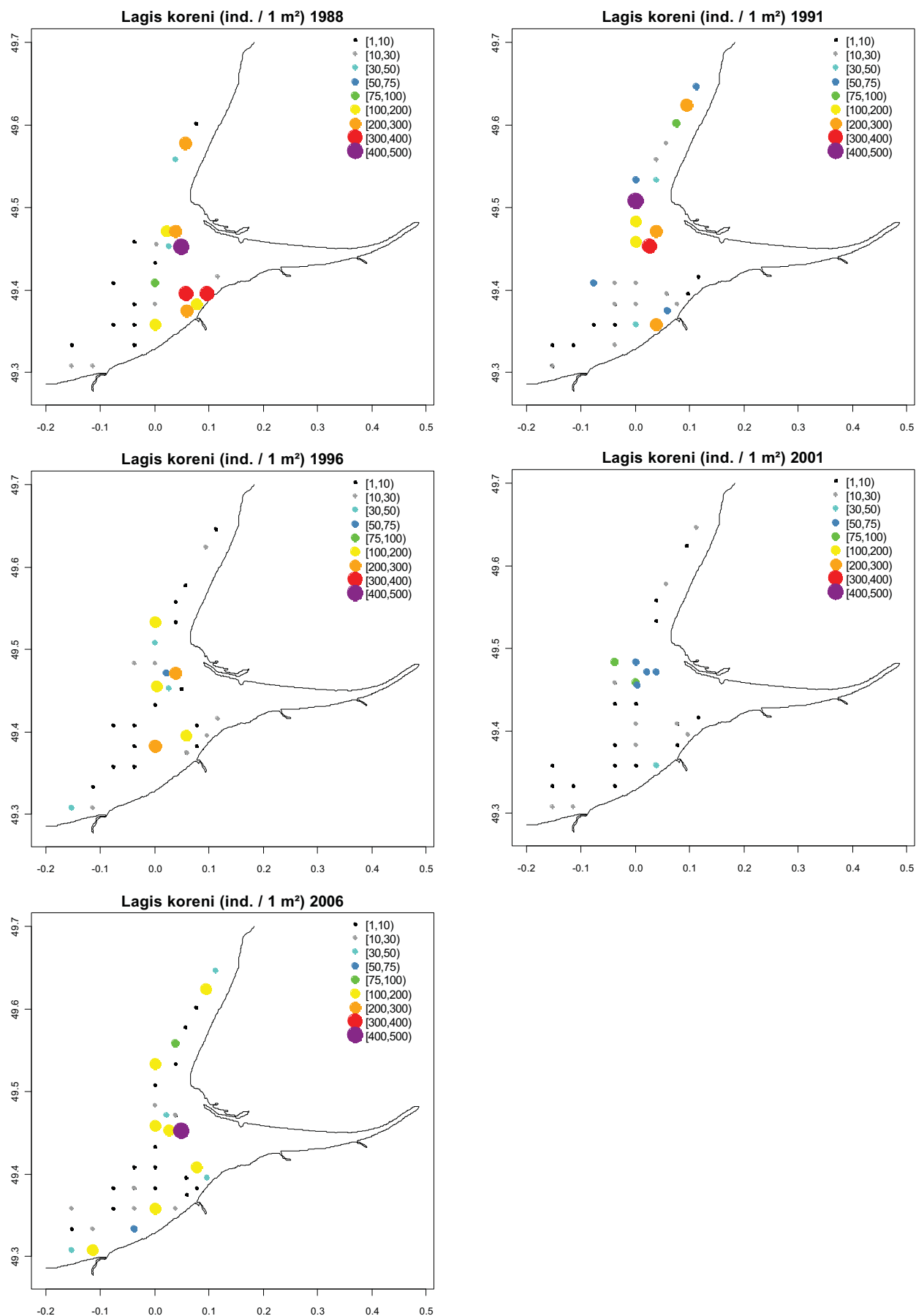


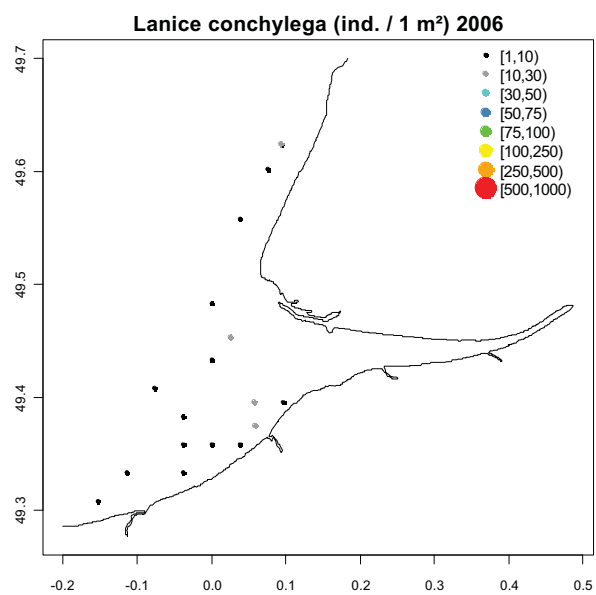
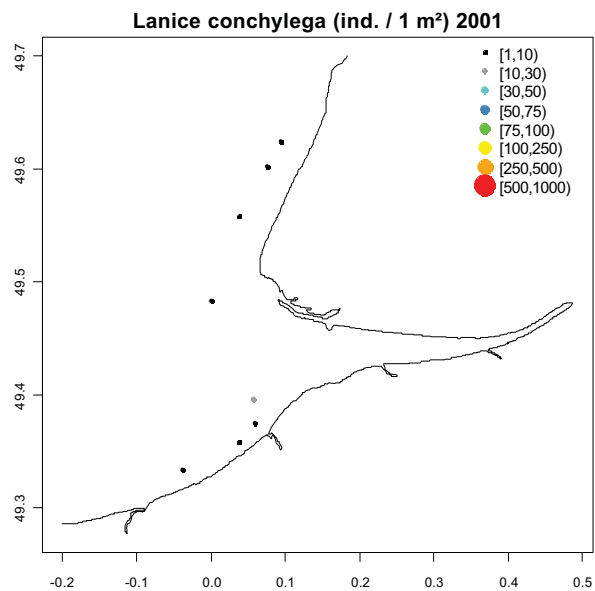
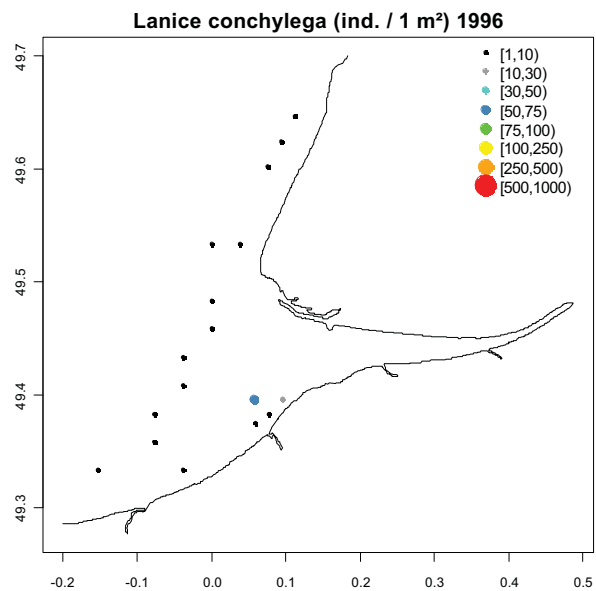
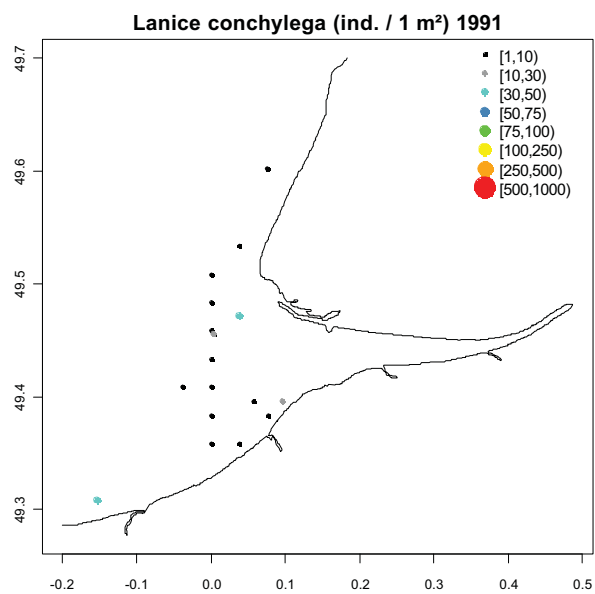
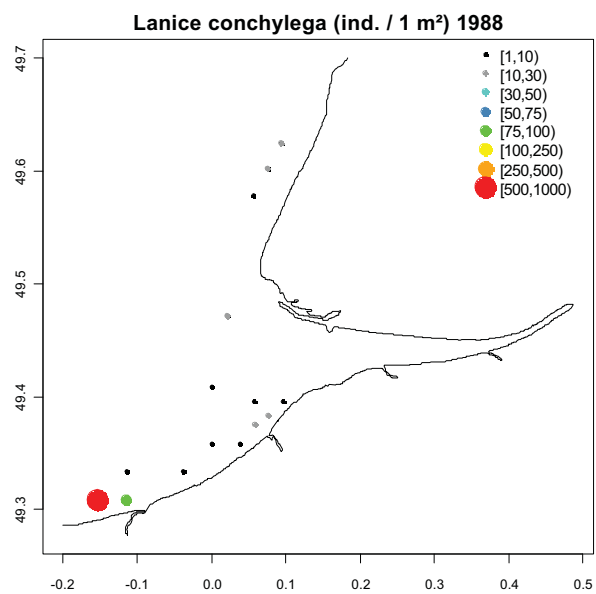


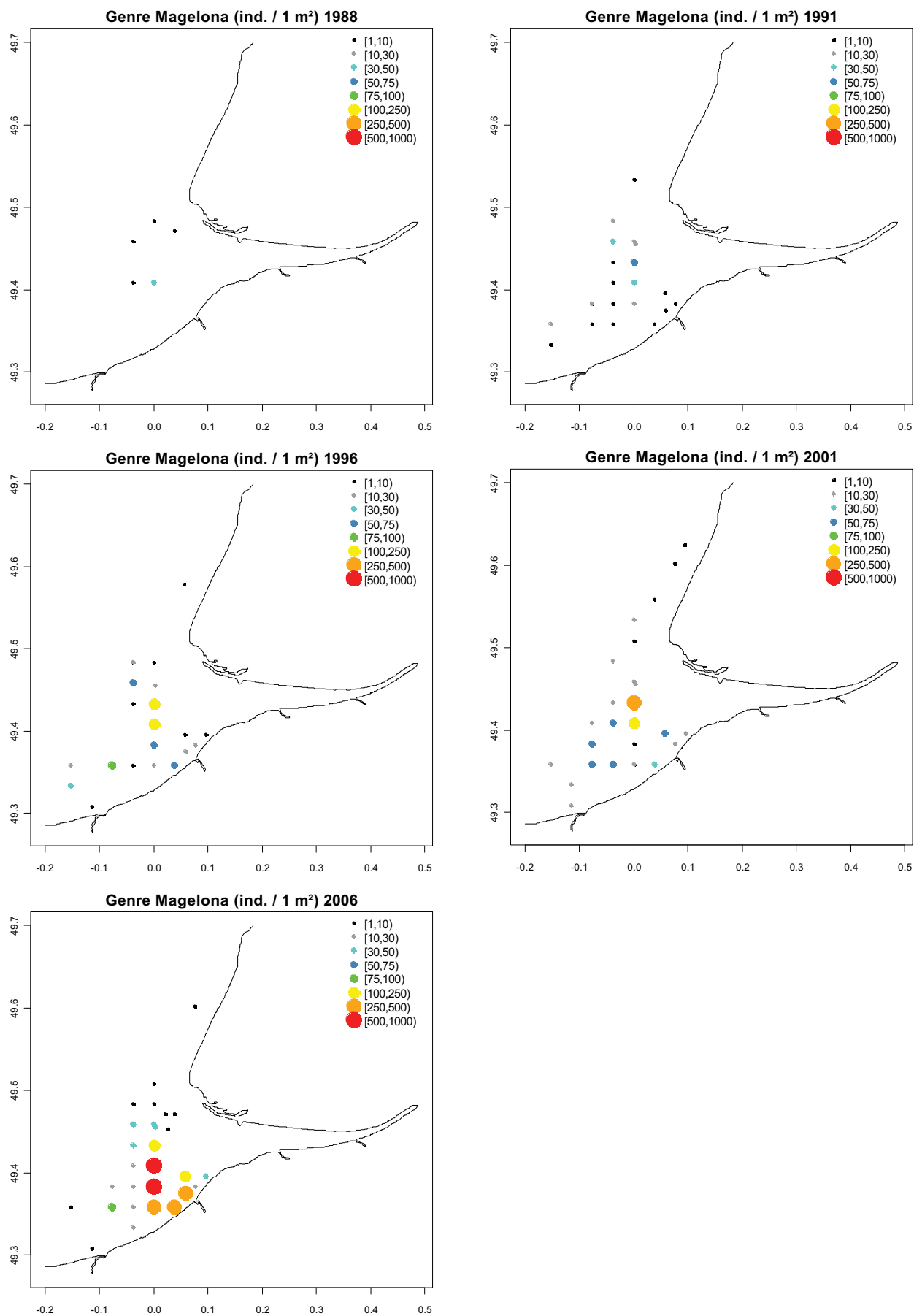


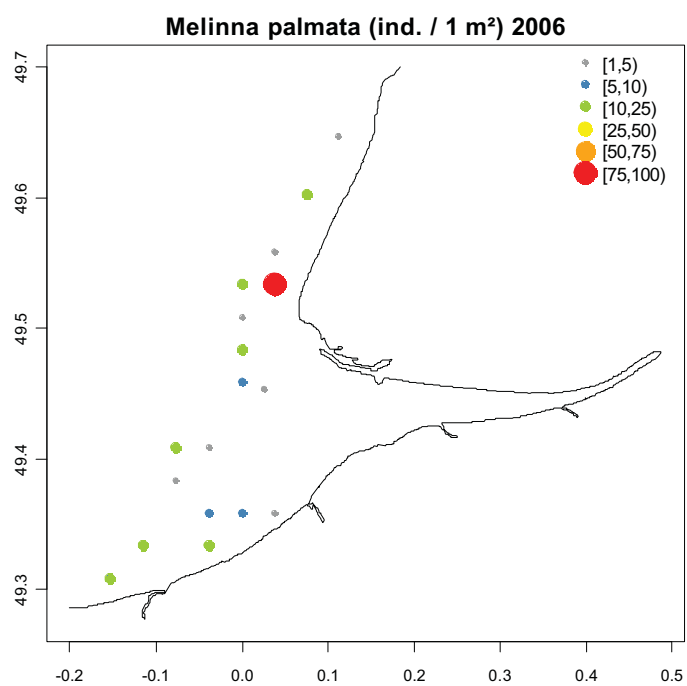


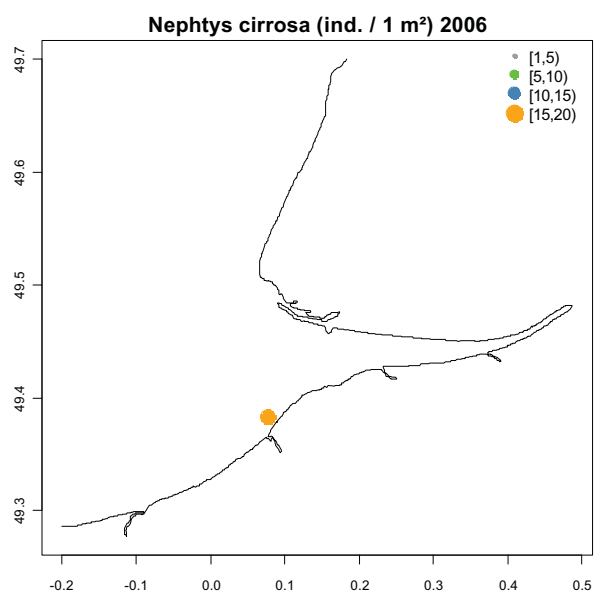
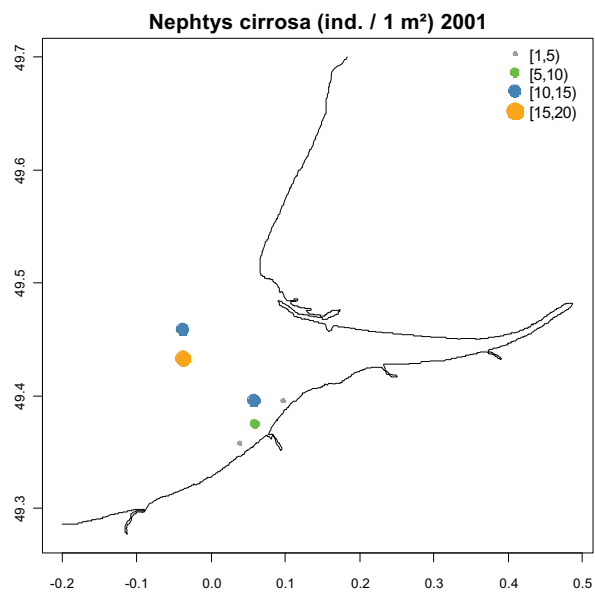
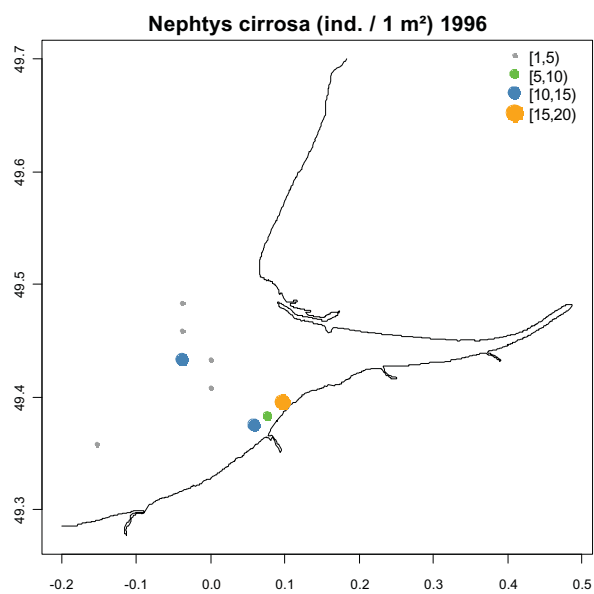
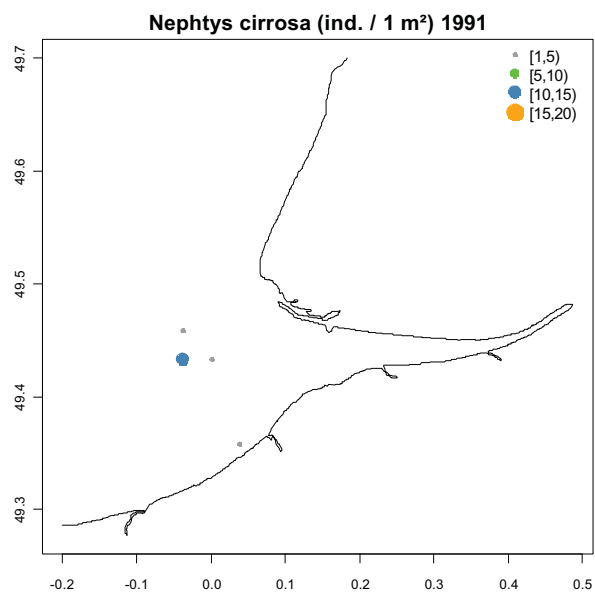
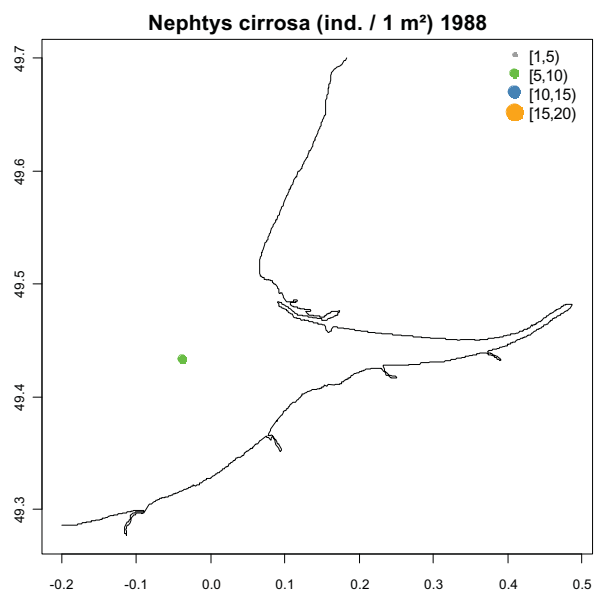




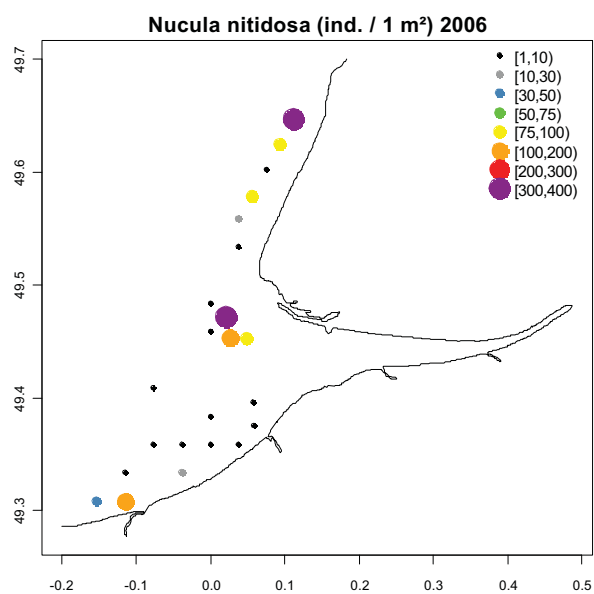
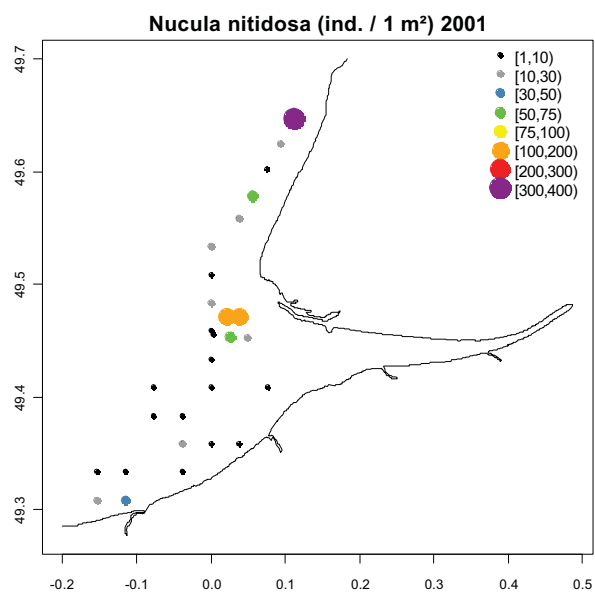
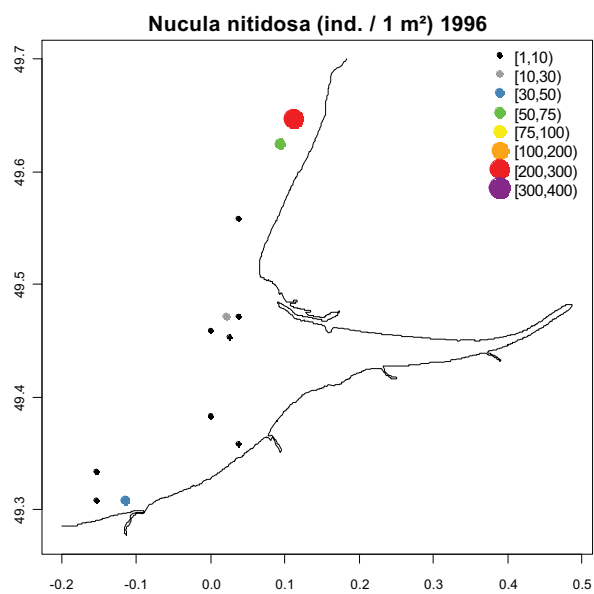
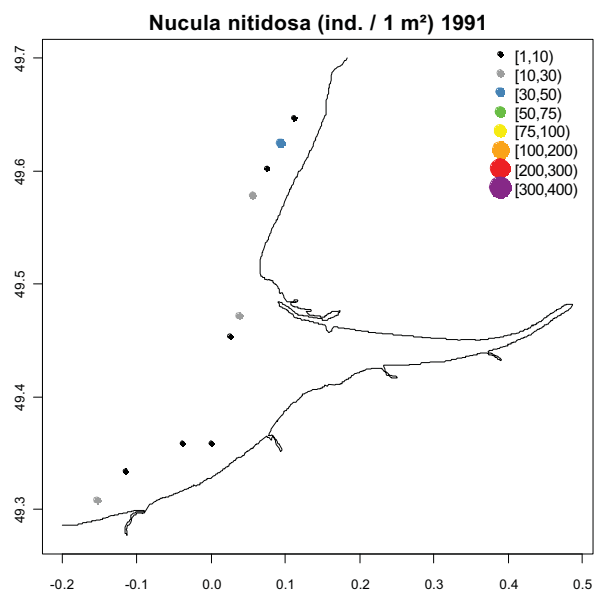
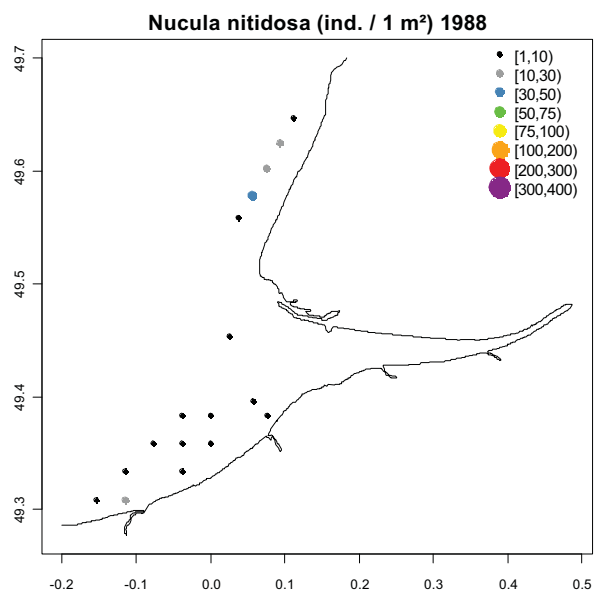


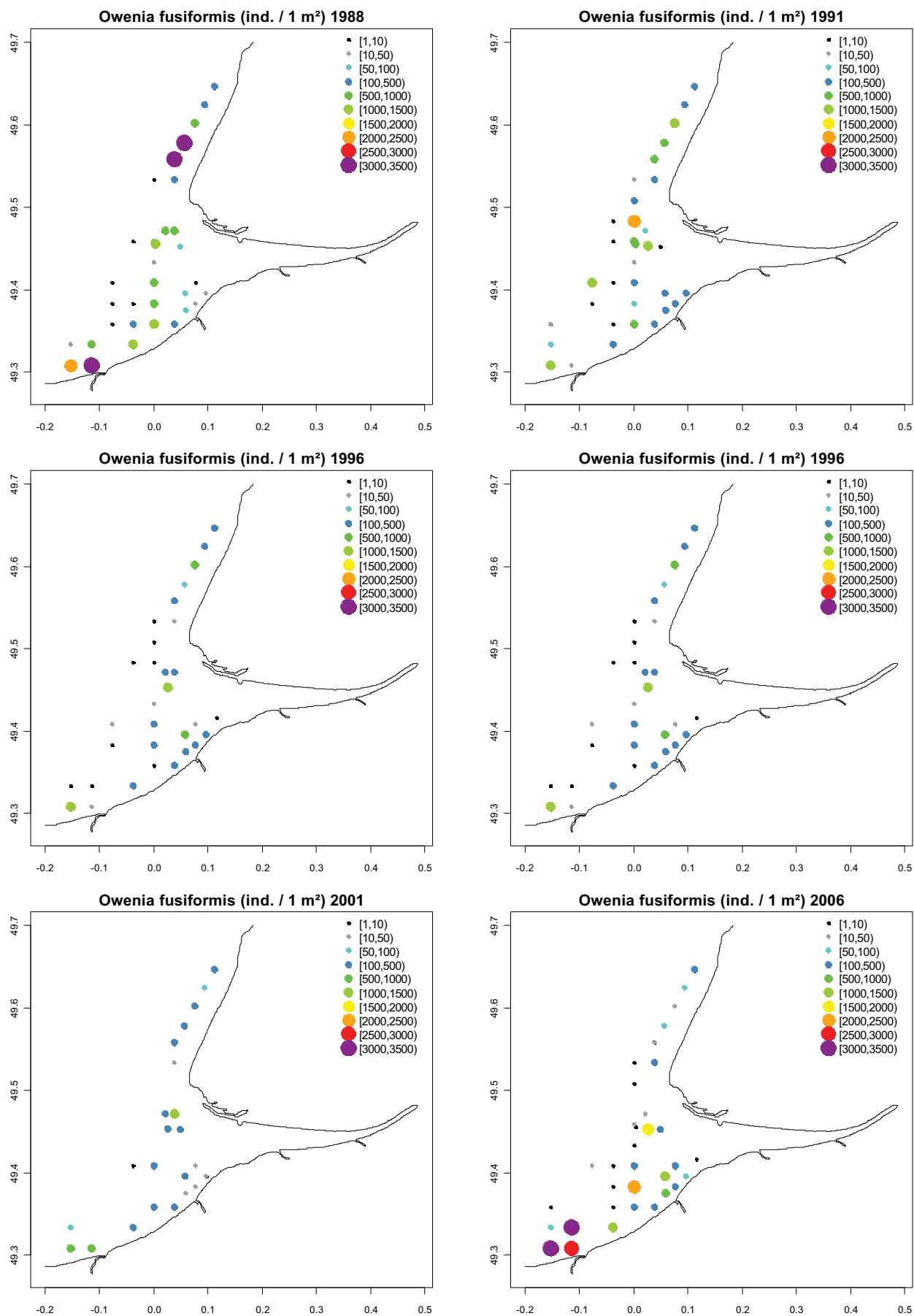




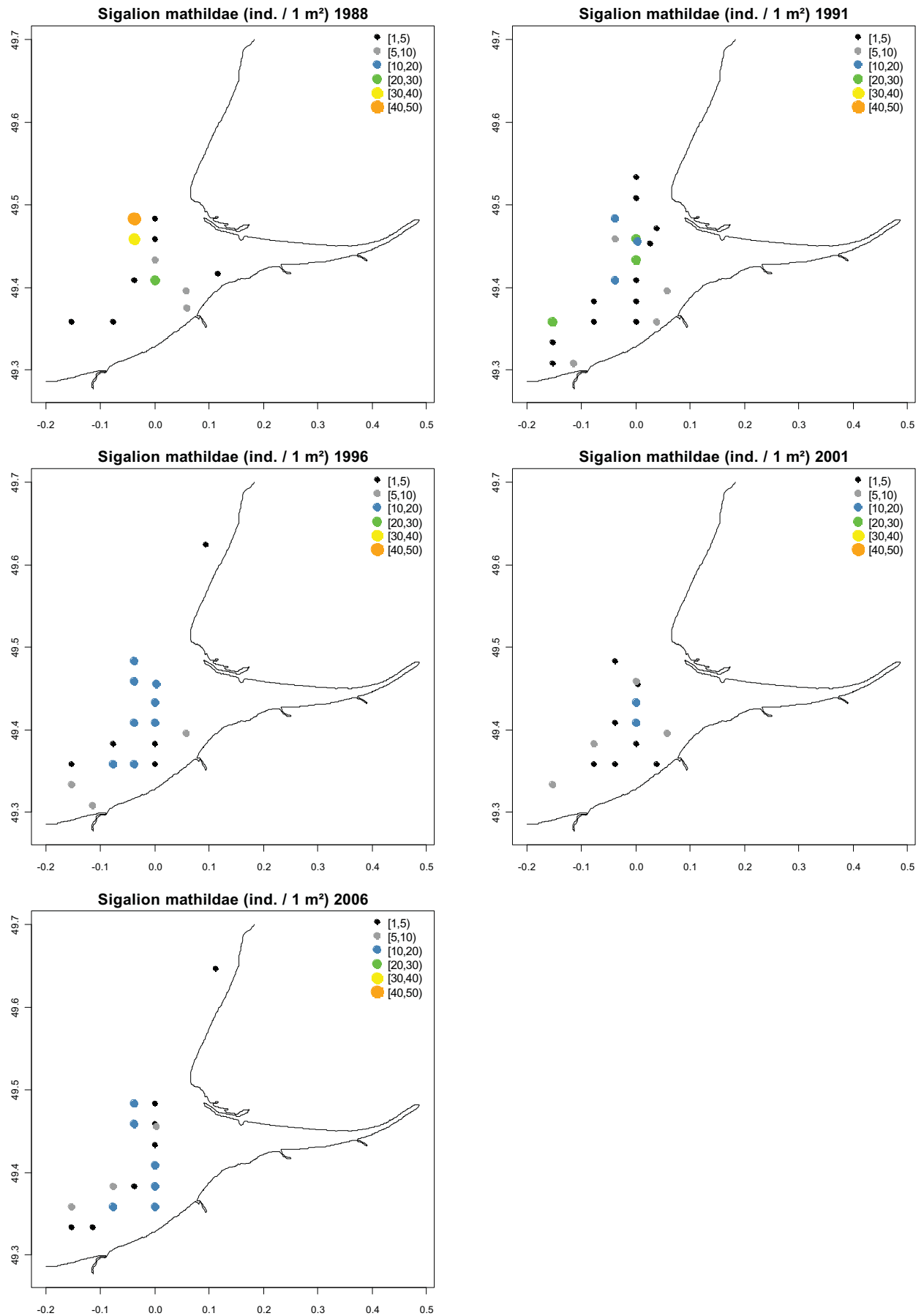










C




*Publications parues ou soumises au cours de ces trois années de thèse.*

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

 **Dauvin J.C., Rolet C., Alizier S.A. & Ruellet T., 2011.** Spatial patterns in suprabenthic communities in the English Channel. *Journal of Sea Research*, 65: 182-185.

 **Dauvin J.C., Alizier S.A., Rolet C., Bakalem A., Bellan G., Gomez Gesteira J.L., Grimes S., de-la-Ossa-Carretero J.A. & Del-Pilar-Ruso Y., 2012.** Response of different benthic indices to diverse human pressures. *Ecological Indicators*, 12: 143-153.

 **Jourde J., Alizier S.A., Dancie C., Dauvin J.C., Desroy N., Dubut S., Gentil F., Grall J., Hanin C., Lanshere J. & Thiébaud E., soumis (2011).** 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*.



## Short communication

## Spatial patterns in suprabenthic communities in the English Channel

Jean-Claude Dauvin<sup>a,b,\*</sup>, Céline Rolet<sup>a,b</sup>, Sandrine Alizier<sup>a,b</sup>, Thierry Ruellet<sup>c</sup><sup>a</sup> Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France<sup>b</sup> Université de Lille1, Station Marine de Wimereux, UMR LOG, 28 avenue Foch, BP 80, F-62930 Wimereux, France<sup>c</sup> GEMEL Picardie, 115 quai Jeanne d'Arc, F-80230 Saint Valéry sur Somme, France

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 27 August 2009

Received in revised form 8 June 2010

Accepted 21 July 2010

Available online 1 August 2010

## Keywords:

Suprabenthos

English Channel

Offshore Site

Species Richness

Abundance

## ABSTRACT

The purpose of this paper was to establish the main characteristics of the suprabenthic communities of the English Channel including those found in a potential aggregate extraction zone located in the central part. Sampling was carried out with a Macer-GIROQ sledge during four periods in 2007. In this offshore site, the suprabenthic faunal composition and abundance were close to those observed in other similar sites in coarse sand to pebbles in the western and eastern parts of the English Channel. But, the species richness was low (65 species). Amphipods were the dominant group in terms of diversity and abundance. Only a few species, mostly amphipods and decapods, showed significant daily migration. Seasonal variations were moderate. Due to the similar suprabenthic fauna having good swimming ability, the aggregate extraction zone in the central part of the Channel could be rapidly colonized after exploitation and thus could rapidly insure a feeding resource for fish, which are attracted by abundant prey.

© 2010 Published by Elsevier B.V.

## 1. Introduction

As defined by Brunel et al. (1978), the suprabenthos includes all bottom-dependent animals (mainly crustaceans, especially peracarids and decapods) that perform daily or seasonal vertical migrations with variable regularity. For studying this compartment living just above the seabed, specially designed samplers, generally known as hyperbenthic or suprabenthic sledges, have been developed over the last 30 years. However, the organisms chosen to characterize the fauna living in this interface between pelagic and benthic systems remain a subject of controversy in numerous recent studies (see Mees and Jones (1997) and Dauvin and Vallet (2006) for reviews).

There has been an increase in suprabenthos studies in recent years in many places around the world, especially in temperate continental shelf seas, such as the North Sea (Beyst et al., 2001; Dewicke et al., 2002, 2003), the Channel (see Dauvin et al., 2000, 2006, 2008, 2010; Vallet and Dauvin, 2001; Vallet et al., 2001), the Bay of Biscay (Sorbe, 1989), the Portuguese margin (Cunha et al., 1997), and the western Mediterranean Sea near the Ebro Delta (i.e. the Catalan Sea) (Cartes et al., 2007). But for these zones, the number of suprabenthos sampling sites remains ridiculously low compared to the prospected benthic sites.

Since the surface exploited for aggregate extraction was poised for expansion, a suprabenthos reference status had to be established before operations began in the new surfaces. This was the case for an offshore zone in the Bay of Seine in the centre of the eastern English Channel,

where a two-site study of the suprabenthos was conducted in 2007 to assess the suprabenthic community as a potential compartment able to rapidly colonize the newly exploited surfaces.

The objectives of this paper are 1) to give the main characteristics of the suprabenthos sampled in these two offshore sites, 2) to compare the suprabenthos found in these sites to a large data set from more than 500 suprabenthic hauls taken with a modified Macer-GIROQ sledge in 16 other sites off the English Channel for a total of 18 sites (Vallet and Dauvin, 1998; Dauvin et al., 2000, 2008; Dauvin and Vallet, 2006), and 3) to suggest a design for sampling the suprabenthos to evaluate its capacity to colonize aggregate the extraction site after exploitation.

## 2. Materials and methods

## 2.1. Sampling site location and sampling

Suprabenthos organisms were sampled at two sites in the paleovalley of the Seine River in the northern Bay of Seine, which is in the central eastern part of the English Channel, respectively St5 (49°49.00'N–00°59.20'W; 43 m deep on coarse sand and gravel) and St34 (50°04.10'N–00°30.00'W; 50 m deep on coarse sand and gravel). The suprabenthos was sampled in all English Channel sites with a four-net Macer-GIROQ suprabenthic sledge (see Dauvin et al. (1995) for a description of the sledge). The sledge was towed against the tidal current for 15 min at a mean speed of 1.5 knots at four dates in 2007: 5–6 April, 18–19 June, 5–6 September and 26–27 October. A total of 16 hauls was collected during the four campaigns, 8 at St5 and 8 at St34, with one daytime and one night-time sample at each site for each date.

\* Corresponding author. Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France.  
E-mail address: [jean-claude.dauvin@univ-lille1.fr](mailto:jean-claude.dauvin@univ-lille1.fr) (J.-C. Dauvin).

A Tsurimi–Seiki Kosakusho (TSK) flow meter measured the volume of the water filtered through each net; the filtered volume varied from to 94 m<sup>3</sup> to 392 m<sup>3</sup>, and the mean volume of filtered water for the four-net levels varied from 157 to 339 m<sup>3</sup>, with an overall mean of 247 m<sup>3</sup>.

The material collected was fixed onboard with 10% neutral formalin immediately after sample retrieval, then conserved in 70% ethanol. All suprabenthic individuals were sorted, counted and identified to the species level whenever possible. The mean number of individuals in each net or haul was standardized to 100 m<sup>3</sup>. Following a similar strategy to Dauvin et al. (2008), only the lowest net (net 1 – 0.10–0.40 m) and the highest net (net 4 – 0.15–1.45 m) were considered, as they were judged sufficient to illustrate the vertical stratification in the English Channel due to the high turbulence in such megatidal sea (Dauvin et al., 2000).

The data obtained during this 2007 study were compared to those obtained previously at 16 other English Channel sites (Dauvin and Zouhiri, 1996; Vallet and Dauvin, 1998; Mouny et al., 2000; Vallet et al., 2001; Dauvin et al., 2008) (see Dauvin et al., 2000, 2008 for the locations of the sampling sites). To minimize the seasonal temporal effect on the suprabenthic fauna, only the spring situation was taken into account in these comparisons (i.e., from the 5th April to 25th June) from 1993 to 2007. Before the statistical analysis (Bray–Curtis similarities), the species abundance values were broken down into six classes: 0.5 (0.01–1 ind 100 m<sup>−3</sup>), 1 (1.01–5 ind 100 m<sup>−3</sup>), 2 (5.01–20 ind 100 m<sup>−3</sup>), 3 (20.01–100 ind 100 m<sup>−3</sup>), 4 (100.01–500 ind 100 m<sup>−3</sup>) and 5 (>500 ind 100 m<sup>−3</sup>).

## 2.2. Statistical analysis

In order to explain the relationships between the data at all 18 sampling sites, the Sorensen similarity coefficient was calculated with the Presence/Absence of the species and the Bray–Curtis similarities were used on the classes abundance matrix (Primer 6 software © E-Primer-Ltd) (Clarke and Warwick, 2001). Non-metric multidimensional scaling (MDS) plots based on triangular matrices of the Sorensen's coefficient which accounts double weight of the presence of the species and Bray–Curtis similarities on class abundances were used to identify assemblages (Clarke and Warwick, 2001). Depending on the amount of available data, Wilcoxon–Mann–Whitney tests (independent samples for only two states), Wilcoxon tests (paired samples for only two states) or Kruskal–Wallis tests (more than two states) were used to compare the difference between estimated species richness and abundance of the samples collected in net 1 and net 4 during the day and the night for the four sampling periods. The same tests were used to examine the vertical distribution, daily migration and seasonal distribution of the 17 principal species (species showing an abundance >1 ind 100 m<sup>−3</sup> at least once).

## 3. Results

### 3.1. Suprabenthos species richness in the central part

A total of 65 species was collected, including 40 amphipods, 7 mysids and 7 decapods. The other groups were less diversified: 6 isopods, 3 cumaceans and 2 pycnogonids. At St5, 50 species were collected, including 29 amphipods, 6 mysids, 6 isopods, 5 decapods, 2 cumaceans, and 2 pycnogonids. St34 was slightly more diversified, with a total of 58 species including 35 amphipods, 7 mysids, 7 decapods, 5 isopods, 3 cumaceans and 1 pycnogonid. Forty-three species were found at both sites; seven species were collected only at St5, while 15 species were found only at St34. Nevertheless, there was no significant difference between species richness at both sites [ $U(4; 4) = 6; p = 0.68$ ] (Table 1).

The species richness was significantly higher at night than during the day (St5: 33 species during the day, <44 species at night; St34: 33 species during the day, <52 species at night;  $U = 3; p = 0.001$ ) and

**Table 1**

Results of the statistical analyses for Day/Night, vertical N1/N4 and seasonal changes for the 17 main species collected at sites St5 and St34 (WMW: Wilcoxon–Mann–Whitney test; KW: Kruskal–Wallis test; D: Day; N: Night; N1: Net 1; N4: Net 4; NS: not significant; S: significant at 5% or 1%\*\*) and mean total abundance (at night, day and both), and mean species richness (at night, day and both).

Central English Channel	Mean abundance (ind 100 m <sup>−3</sup> )		WMW	Wilcoxon	KW
	St5	St34	D/N	N1/N4	Season
<b>Amphipods</b>					
<i>Amphilocheus neapolitanus</i>	1.01	0.28	N>D*	NS	NS
<i>Apherusa bispinosa</i>	73.75	202.02	NS	NS	NS
<i>Apherusa clevei</i>	1.24	23.00	NS	NS	NS
<i>Apherusa ovalipes</i>	11.40	61.86	D>N**	NS	S*
<i>Atylus vedlomensis</i>	0.61	0.44	NS	NS	NS
<i>Erichthonius punctatus</i>	0.81	0.71	N>D**	NS	NS
<i>Eusirus longipes</i>	0.95	7.30	N>D**	NS	NS
<i>Gammarellus angulosus</i>	2.10	0.36	NS	NS	S**
<i>Stenothoe marina</i>	6.30	3.11	NS	NS	NS
<i>Synchelidium maculatum</i>	0.78	0.71	N>D**	S*	NS
<b>Mysids</b>					
<i>Acanthomysis longicornis</i>	9.88	85.57	NS	NS	NS
<i>Anchialina agilis</i>	25.26	47.90	NS	NS	S*
<i>Mysidopsis gibbosa</i>	1.61	0.29	NS	NS	NS
<i>Siriella jaltensis</i>	18.07	32.07	NS	S*	S**
<b>Isopods</b>					
<i>Gnathia vorax</i>	3.87	3.51	D>N**	NS	NS
<b>Decapods</b>					
<i>Galathea intermedia</i>	2.49	1.30	N>D**	NS	NS
<i>Pandalina brevivirostris</i>	4.38	6.23	N>J**	S*	NS
Mean total abundance	173.75	482.75	NS	NS	NS
Mean total abundance at day	204.00	443.50			
Mean total abundance at night	143.50	523.00			
Mean species richness	31.00	33.25	N>D**	S*	NS
Mean species richness at day	16.25	16.50			
Mean species richness at night	27.25	27.75			

significantly higher for net 1 than for net 4 [ $T(4; 4) = 13; p = 0.02$ ] (Table 1). Species richness was maximum in June (38) and minimum in September (24), and it had an intermediate value in April (29) and October (33) at St5. At St34, it was maximum in October (40) and stable for the three other sampling dates (respectively, 31 in April, 32 in June and 30 in September). There was no significant seasonal difference in terms of species richness (Table 1).

### 3.2. Suprabenthos abundance in the central part

A total of 4274 individuals was collected at St5 and 9345 individuals at St34. The abundances were significantly higher at St34 than at St5 [ $U(4; 4) = 0; p = 0.03$ ], which meant that the mean abundance was lower at St5 (174 ind 100 m<sup>−3</sup>) than at St34 (483 ind 100 m<sup>−3</sup>). While the abundance at St34 was maximum in September (727 ind 100 m<sup>−3</sup>), for the same period, the abundance was minimum at St5 (56 ind 100 m<sup>−3</sup>). At St5, the abundance was on the same order of magnitude during the three other sampling periods (~200 ind 100 m<sup>−3</sup>); however, at St34, it increased regularly from April (283 ind 100 m<sup>−3</sup>) to September and decreased in October to a value similar to the one observed in June (~460 ind 100 m<sup>−3</sup>). Nevertheless, there was no significant seasonal difference in terms of abundance, with no day/night difference and no net 1/net 4 difference for both sites (Table 1).

Numerically, amphipods dominated the fauna at St5 (from 45% in October to 91% in September) and St34 (from 37% in October to 92% in September); mysids dominated both sites in October, with 56% at St34 and 45% at St5. The other suprabenthic fauna made up very little of the total abundance at both sites for all four sampling periods.



Only 17 species—10 amphipods, 4 mysids, 2 decapods and 1 isopod—were common to both sites, with an abundance  $>1$  ind  $100\text{ m}^{-3}$  at least once (Table 1). These dominant species represented 94.68% of the total abundance at St5 and 98.74% at St34. There was no significant difference between mean daytime and night-time abundances [ $U(4; 4) = 26$ ;  $p = 0.28$ ]. Four amphipods (*Amphilocheus neapolitanus*, *Erichthonius punctatus*, *Eusirus longipes* and *Synchelidium maculatum*) and two decapods (*Galathea intermedia* and *Pandalina brevivirostris*) had higher abundances at night than during the day (Table 1). Conversely, two other species—the amphipod *Apherusa ovalipes* and the isopod *Gnathia vorax*—had significantly higher daytime abundances than night-time abundances. Only four species—two amphipods (*Gammarus angulosus* and *Apherusa ovalipes*) and two mysids (*Siriella jaltensis* and *Anchialina agilis*)—exhibited significant seasonal changes (Table 1).

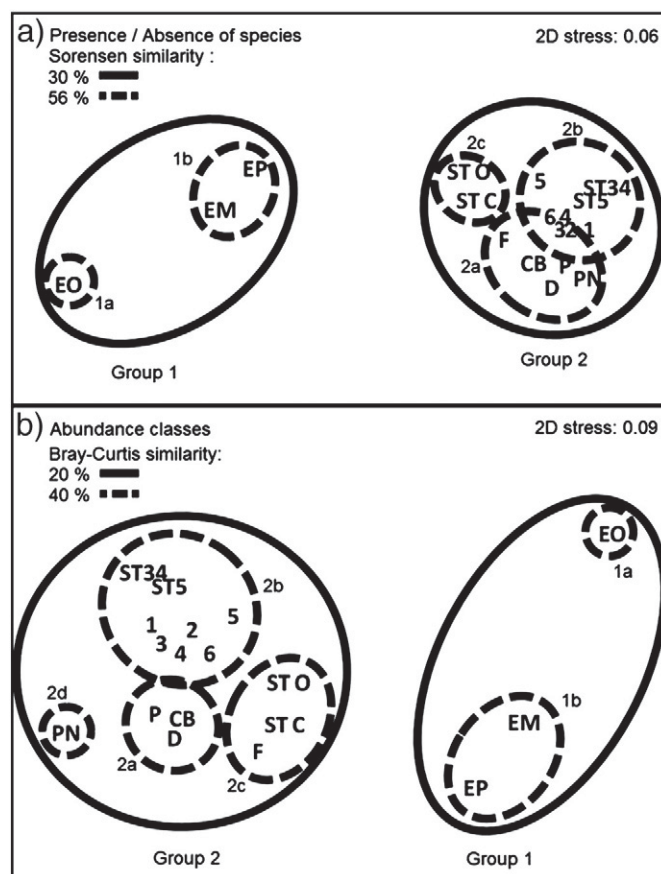
### 3.3. Suprabenthos spatial patterns in the English Channel

Two main groups of sites were identified from the species composition in the 18 sites using the Sorensen coefficient (1/0) and plotted with MDS (Fig. 1a). The first group corresponds to the three Seine estuary sites, which can be sub-divided in two assemblages: (1a) Oligohaline (EO) estuarine zone and (1b) Mesohaline (EM) and Polyhaline (EP) estuarine zones (5 m deep). The second group corresponded to the remaining sites, which can be sub-divided in three main assemblages: (2a) five shallow sites (8–24 m deep) on fine and coarse sand, (2b) eight deep offshore sites (25–75 m deep) on medium and coarse sand and pebbles; and (2c) two intermediate sites (21–22 m deep) on the medium-grained sand in front of Canche Bay. The MDS of the abundance also identified two main groups (Fig. 1b) with similar assemblages, except for the shallow fine sand, which split into three component: (2a) the three Bay of Saint-Brieux sites, (2c) the F site in the Bay of Seine together with the two sites offshore of the Canche estuary, and (2d) an isolated Pierre Noire site in the Bay of Morlaix, which had very high abundances of *Ampelisca* amphipods.

## 4. Discussion

Most studies performed on the continental shelf suprabenthic communities in the world show that amphipods and mysids dominate in species numbers and numerically; however mysids dominate numerically the estuarine shallow waters while amphipods dominate the open waters (Sorbe, 1989; Mees and Jones, 1997; Dewicke et al., 2002, 2003; Cartes et al., 2007; Heyns and Froneman, 2010). The suprabenthic abundances were mainly correlated with the input of organic matter coming from the freshwater zones of the rivers and estuaries; for the offshore sites, they appeared to be correlated with the input of organic matter sinking from the water column (Mees and Jones, 1997; Dauvin et al., 2000; Dauvin and Vallet, 2006; Cartes et al., 2007; Heyns and Froneman, 2010). Furthermore, Heyns and Froneman (2010) show that the suprabenthic community densities and biomass from the warm temperate southern African permanently open Kariega estuary reflects interaction between physical environment and increase food availability, i.e. the organic content of the sediment and food availability (Chl-a). Dewicke et al. (2002) have also documented high abundances on the Frisian front in the North Sea, which could be explained by active migration and/or by passive transport to the food-enriched area. Furthermore, in many cases, temporal changes were due to a sudden peak in the abundances of some species (e.g., amphipods) during their nuptial phases (Sorbe, 1989; Buhl-Jensen and Fossa, 1991; Dauvin and Zouhiri, 1996) or to swarms of mysids (Buhl-Jensen and Fossa, 1991; Zouhiri et al., 1998). These fluctuations were often difficult to interpret and hid the real seasonal changes.

In the centre of the Channel, the species composition was similar and comparable to those observed in other sites from medium sand to pebbles of the English Channel. The fauna was dominated by amphipods and mysids and was typical of the marine suprabenthic



**Fig. 1.** A two-dimensional MDS ordination of Presence/Absence based on Sorensen similarity (a) and of abundance (Number of individuals per  $100\text{ m}^{-3}$ ) based on Bray-Curtis similarity (b), of the 18 sampling sites in the English Channel. 1, Offshore Roscoff,  $48^{\circ}51.20'N-03^{\circ}53.20'W$ , coarse sand, depth 75 m, 5 June 1993; PN, Bay of Morlaix (Pierre Noire),  $48^{\circ}42.30'N-03^{\circ}51.58'W$ , fine sand, depth 17 m, 17 June 1994; 2, Offshore Plymouth,  $49^{\circ}53.75'N-04^{\circ}13.00'W$ , medium sand, depth 75 m, 10–13 June 1993; 3, Normand-Breton Gulf,  $48^{\circ}50.20'N-02^{\circ}42.50'W$ , coarse sand and pebbles, depth 33 m, 3 June 1993; CB, Bay of Saint-Brieuc (Centre),  $48^{\circ}39.50'N-02^{\circ}40.20'W$ , coarse sand, depth 24 m, 10 May 1996; P, Bay of Saint-Brieuc (Le Palus),  $48^{\circ}35.90'N-02^{\circ}37.50'W$ , muddy fine sand, depth 23 m, 11 May 1996; D, Bay of Saint-Brieuc (Dahouet),  $48^{\circ}41.80'N-02^{\circ}50.50'W$ , muddy fine sand, depth 12 m, 10 May 1996; ST5, Centre of the Channel,  $49^{\circ}49.00'N-00^{\circ}59.20'W$ , coarse sand and gravel, depth 43 m, 5 April and 19 June 2007; ST34, Centre of the Channel,  $50^{\circ}04.10'N-00^{\circ}30.00'W$ , coarse sand and gravel, depth 50 m, 5 April and 18 June 2007; 4, Bay of Seine,  $49^{\circ}37.60'N-00^{\circ}12.57'W$ , medium sand and gravel, depth 29 m, 28 May 1993; F, Mouth of the Seine estuary,  $49^{\circ}26.26'N-00^{\circ}31.30'E$ , muddy fine sand, depth 8 m, 30 May 1996; EP, Polyhaline Seine estuary,  $49^{\circ}26.10'N-00^{\circ}06.15'E$ , muddy fine sand, depth 5 m, 25 June 1996; EM, Mesohaline Seine estuary,  $49^{\circ}26.08'N-00^{\circ}15.00'E$ , fine sand to coarse sand, depth 5 m, 24–25 June 1996; EO, Oligohaline Seine estuary,  $49^{\circ}26.80'N-00^{\circ}25.00'E$ , coarse sand, depth 5 m, 23 April 1996; 5, Dover Strait,  $50^{\circ}54.50'N-01^{\circ}34.00'E$ , pebbles, depth 25 m, 24–26 May 1996; 6, Dover Strait,  $50^{\circ}48.00'N-01^{\circ}19.50'E$ , medium sand, depth 29 m, 20–23 May 1996; ST C, Bay of Canche (coast),  $50^{\circ}32.00'N-01^{\circ}30.00'E$ , medium sand, depth 21 m, 10 May 2002; ST O, Bay of Canche (offshore),  $50^{\circ}36.00'N-01^{\circ}04.00'E$ , medium sand, depth 22 m, 12 May 2002.

community previously described by Dauvin et al. (2000). Nevertheless, its spring species richness was particularly low compared to those observed elsewhere during the same period in other Channel sites. Moreover, the species richness values of the suprabenthos (32 species at St5 and 38 species at St34) were similar to those observed by Dewicke et al. (2002) in the North Sea on the Frisian front (41 species in April and 38 species in August). The abundances observed in both sites were moderate without significant seasonal changes. The spring abundances ( $140\text{--}640$  ind  $100\text{ m}^{-3}$ ) were much lower than those observed in sand communities, such as in the Bay of Morlaix or the eastern part of the Bay of Seine which contained between 3200 and 4000 ind  $100\text{ m}^{-3}$  and in the Seine estuary (Mouny et al., 2000)



or in the Scheldt estuary (Dewicke et al., 2003), where abundances higher than 20,000 ind 100 m<sup>-3</sup> have been commonly observed.

It is remarkable that in the English Channel marine coarse sand and pebbles suprabenthic community is dominated by only a few species. Among them, there are the amphipods [*Apherusa* spp., *Atylus* spp. and *E. longipes*], which are present in the western part of the Channel but are also found in the centre of the Channel, as indicated by this study's suprabenthos samples, which confirms the influence of Atlantic waters in this zone of the Channel [*Megaluropus agilis* (absent from both sites in the central Channel), *Melphipidella macra*, *Orchomene nana*, *Stenothoe marina* and *S. maculatum*, the cumacean *Pseudocuma longicorne*, and the mysids *A. agilis*, *Gastrosaccus spinifer* and *Siriella* spp.] (Dauvin et al., 2000, 2008, this study). These are all species with good swimming abilities, suggesting a wide bio-geographical distribution in the north-eastern Atlantic that is independent of a single sediment type. They are also the dominant species in most of the suprabenthic studies on the continental shelf—in the Gullmarfjord (Buhl-Jensen and Fossa, 1991), on the Frisian front in the North Sea (Dewicke et al., 2002), on the Belgian sandbanks in the southern section of the North Sea (Dewicke et al., 2003), in the southern part of the Bay of Biscay (Sorbe, 1989) and in the Catalan Sea (Cartes et al., 2007). This analogous suprabenthic fauna at a large scale for the continental shelf is probably due to its swimming capacity. Mobility may be a supplementary advantage to anticipate stochastic events in highly unpredictable environments (Mees and Jones, 1997). The night migration into the water column favours animal dispersion. High tidal currents with high turbulence through the water column in coarse sand and pebble offshore zones reinforce also rapid transport of pelagic organisms and participate to a homogenization of the suprabenthic fauna (Dauvin et al., 2000).

Both central English Channel sites are located in a deep zone (40 and 50 m) that is ideal for aggregate extraction. An area of about 50 km<sup>2</sup> was prospected in 2007 with the objective of obtaining permission from the French government to extract granular material. Due to French regulations, before aggregate extraction begins, the quarry industry needs to describe the main characteristics of the topography, the sediment and the biological components, especially the benthos and the fish, including ichthyoplankton ([http://www.ifremer.fr/drogm/ressources\\_minerales/materiaux\\_marins/protocole\\_pour\\_l\\_etat\\_de\\_reference](http://www.ifremer.fr/drogm/ressources_minerales/materiaux_marins/protocole_pour_l_etat_de_reference), which we consulted on 26th June 2009). However, this time, a survey of the suprabenthos was not required.

However, it is known that colonization, by mobile scavengers and predators, is a common feature in areas that have been disturbed (Hall, 1994). In fact, the indirect effects of dredging activity are considered to be a possible mechanism contributing to the increase in the numbers and biomass of mobile epibenthic species (Smith et al., 2006). For example, fifteen years after the dredging activity ceased in an experimental dredging site in the eastern part of the Bay of Seine, the dominant groups were amphipods (abundance) and sea-urchins (biomass) (Desprez, 2000). Similarly, due to their swimming capability, suprabenthos were not influenced by trawling activity in the Catalan Sea (Cartes et al., 2007). Motile behaviour was also an advantage to migrate actively towards the food-enriched area (Dewicke et al., 2002).

Consequently, there was some evidence of the ability of the mobile fauna to colonize the exploited zone more rapidly than the endobenthos. The dominant marine suprabenthic species, which showed an extended distribution in the offshore sites in the English Channel, display very good swimming abilities, so they could quickly colonize the exploited aggregate zones and thus could rapidly insure a feeding resource for fish, which are attracted by abundant suprabenthic prey (Mees and Jones, 1997; Dauvin et al., 2000; Dauvin and Vallet, 2006; Cartes et al., 2007). To test this hypothesis, we suggest an experimental design for assessing the temporal suprabenthos replication using a Before/During/After protocol, as was the case for aggregate exploitation for the construction of Port 2000 harbour in the Seine estuary (Dauvin et al., 2006, 2010). This study provides data about the “Before”; the “During” and “After” should be undertaken by the industrial quarry at least twice a year (May–June and

September–October) during extraction operations, and for at least two years after the extraction operations have ceased.

## Acknowledgements

This study was financed through the Groupement d'Intérêt Economique, Granulats de la Manche Orientale (GIE-GMO) contracts with the University of Lille1. The authors are grateful to the crews of the Oceanographic Vessels Côte d'Aquitaine and Côtes de la Manche for their help during sampling, to L. E. Spencer for her comments and help in correcting the English text, and to the two referees for their very useful comments on the first version of the manuscript.

## References

- Beyst, B., Buysse, D., Dewicke, A., Mees, J., 2001. Surf zone hyperbenthos of Belgian sandy beaches: seasonal patterns. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 53, 877–895.
- Brunel, P., Besner, M., Messier, D., Poirier, L., Granger, D., Weinstein, M., 1978. Le traîneau Macer-GIROQ: appareil amélioré pour l'échantillonnage quantitatif de la petite faune nageuse au voisinage du fond. *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* 63, 815–829.
- Buhl-Jensen, L., Fossa, J.H., 1991. Hyperbenthic crustacean fauna of the Gullmarfjord area (western Sweden): species richness, seasonal variation and long term changes. *Mar. Biol.* 109, 245–258.
- Cartes, J.E., Papiol, V., Palanques, A., Guillen, J., Demestre, M., 2007. Dynamics of suprabenthos off the Ebro Delta (Catalan Sea: western Mediterranean): spatial and temporal patterns and relationships with environmental factors. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 75, 501–515.
- Clarke, K.R., Warwick, R.M., 2001. *Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation*, 2nd edition. Plymouth Marine Laboratory, Natural Environment Research Council.
- Cunha, M.R., Sorbe, J.C., Bernardes, C., 1997. On the structure of the neritic suprabenthic communities from the Portuguese continental margin. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 157, 119–137.
- Dauvin, J.C., Vallet, C., 2006. The near bottom layer as an ecological boundary in marine ecosystems: diversity, taxonomic composition and community definitions. *Hydrobiologia* 553, 49–58.
- Dauvin, J.C., Zouhiri, S., 1996. Suprabenthic crustacean fauna of a dense *Ampelisca* community from the English Channel. *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 76, 909–929.
- Dauvin, J.C., Sorbe, J.C., Lorgeré, J.C., 1995. The benthic boundary layer macrofauna from the upper continental slope and the Cap-Ferret Canyon (Bay of Biscay). *Oceanol. Acta* 18, 113–122.
- Dauvin, J.C., Vallet, C., Mouny, P., Zouhiri, S., 2000. Main characteristics of the boundary layer macrofauna in the English Channel. *Hydrobiologia* 426, 139–156.
- Dauvin, J.C., Desroy, N., Janson, A.L., Vallet, C., Duhamel, S., 2006. Recent changes in estuarine benthic and suprabenthic communities resulting from the development of harbour infrastructure. *Mar. Pollut. Bull.* 53, 80–90.
- Dauvin, J.C., Desroy, N., Denis, L., Ruellet, T., 2008. Does the *Phaeocystis* bloom affect the diel migration of the suprabenthos community? *Mar. Pollut. Bull.* 56, 77–87.
- 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)? *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 86, 42–50.
- Desprez, M., 2000. Physical and biological impact of marine aggregate extraction along the French coast of the Eastern English Channel: short- and long-term post dredging restoration. *ICES J. Mar. Sci.* 57, 1428–1438.
- Dewicke, A., Rottiers, V., Mees, J., Vincx, M., 2002. Evidence for an enriched hyperbenthic fauna in the Frisian front (North Sea). *J. Sea Res.* 47, 121–139.
- Dewicke, A., Cattrijsse, A., Mees, J., Vincx, M., 2003. Spatial patterns of the hyperbenthos of subtidal sandbanks in the southern North Sea. *J. Sea Res.* 49, 27–45.
- Hall, S.J., 1994. Physical disturbance and marine benthic communities: life in unconsolidated sediments. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 32, 179–239.
- Heyns, E., Froneman, W., 2010. Spatial and temporal patterns in the hyperbenthic community structure in a warm temperate southern African permanently open estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 8, 105–115.
- Mees, J., Jones, M.B., 1997. The hyperbenthos. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 35, 221–255.
- Mouny, P., Dauvin, J.C., Zouhiri, S., 2000. Benthic boundary layer fauna from the Seine estuary (eastern English Channel, France): spatial distribution and seasonal changes. *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 80, 959–968.
- Smith, R., Boyd, S.E., Rees, H.L., Dearnaley, M.P., Stevenson, J.R., 2006. Effects of dredging activity on epifaunal communities — surveys following cessation of dredging. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 70, 207–223.
- Sorbe, J.C., 1989. Structural evolution of two suprabenthic softbottom communities of the South Gascogne continental shelf. *Sci. Mar.* 53, 335–342.
- Vallet, C., Dauvin, J.C., 1998. Composition and diversity of the benthic boundary layer macrofauna from the English Channel. *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 78, 387–409.
- Vallet, C., Dauvin, J.C., 2001. Biomass changes and benthic-pelagic transfers throughout the benthic boundary layer in the English Channel. *J. Plankton Res.* 23, 903–922.
- Vallet, C., Dauvin, J.C., Hamon, D., Dupuy, C., 2001. Effect of the introduced common slipper shell *Crepidula fornicata* on the suprabenthic biodiversity of the subtidal communities in the Bay of Saint-Brieuc (western English Channel). *Conserv. Biol.* 15, 1686–1690.
- Zouhiri, S., Vallet, C., Mouny, P., Dauvin, J.C., 1998. Spatial distribution and biological rhythms of suprabenthic mysids from the English Channel. *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 78, 1181–1202.

**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)**

Jérôme Jourde<sup>1,2\*</sup>, Sandrine Alizier<sup>3</sup>, Chloé Dancie<sup>2</sup>, Jean-Claude Dauvin<sup>4</sup>, Nicolas Desroy<sup>5</sup>, Séverine Dubut<sup>2</sup>, Franck Gentil<sup>6,7</sup>, Jacques Grall<sup>8</sup>, Camille Hanin<sup>2</sup>, Julien Lanshere<sup>2</sup> and Eric Thiébaud<sup>6,7</sup>.

<sup>1</sup> Observatoire Faune-Flore des Pertuis Charentais (OBIONE), Institut du Littoral et de l'Environnement, Université de La Rochelle, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle, France.\* Corresponding author: Fax: (33) 05 46 50 76 63, E-mail: [jjourde@univ-lr.fr](mailto:jjourde@univ-lr.fr).

<sup>2</sup> Cellule de Suivi du Littoral Normand, 53 rue de Prony, 76600 Le Havre, France.

<sup>3</sup> Université Lille 1, Station Marine, CNRS UMR 8187 LOG, 62930 Wimereux, France.

<sup>4</sup> Université de Caen Basse Normandie, Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière, UMR CNRS 6143 M2C, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France.

<sup>5</sup> CRESCO, Station IFREMER, 38 rue du Port-Blanc, BP 80108, 35801 Dinard Cedex, France.

<sup>6</sup> UPMC Université Paris 06, UMR 7144, Equipe Diversité et Connectivité dans les Paysages Marins, Station Biologique de Roscoff, Place Georges Teissier, 29680 Roscoff, France.

<sup>7</sup> CNRS, UMR 7144, Adaptation et Diversité en Milieu Marin, Station Biologique de Roscoff, Place Georges Teissier, 29680 Roscoff, France.

<sup>8</sup> Observatoire du Domaine Côtier, UMS 3113 CNRS, Institut Universitaire Européen de la Mer, rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France.

Condensed title: *Asthenognathus atlanticus* in the Bay of Seine

**Abstract:** *Asthenognathus atlanticus* Monod, 1932, has been reported for the first time from the eastern part of the Bay of Seine (eastern English Channel). A total of 30 specimens was collected between 2008 and 2011 along the Normandy coast from Ouistreham to Antifer, mainly on mud and muddy sand habitats, between 10 and 25 m depth. The distribution range of *A. atlanticus* has been previously known to cover eastern Atlantic coasts from Angola to the western English Channel, where it reached its northern limits. It is also present in the western part of the Mediterranean Sea. It turns out that recent changes in the sediment composition of the eastern Bay of Seine led to the development of a potentially favorable habitat for this species. However, the data collected have not yet been sufficient to ascertain the origin and the method of introduction of the eastern English Channel specimens. In the discussion section, we ponder if they might originate in western English Channel populations and be transported as larvae in the eastern English Channel or if they originate in more distant populations and have been brought to the eastern English Channel due to human activities. Each hypothesis is possible in theory.

**Key Words:** Crustacea Decapoda; *Asthenognathus atlanticus*, Bay of Seine; geographical extension; eastern English Channel.

**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.

## Introduction

*Asthenognathus atlanticus* Monod, 1932 is a small (~10 mm) tropical-temperate brachyuran crab (Udekem d'Acoz, 1999) belonging to the family Varunidae (Ng *et al.*, 2008). This species, mainly living in muddy sediment habitats, is often described as being commensal with tubicolous organisms such as the Anthozoan *Cerianthus membranaceus* Spallanzani, 1784, the Synaptidae Echinoderm *Labidoplax digitata* Montagu, 1815, the Sipuncula *Sipunculus nudus* Linnaeus, 1766 or the Terebellidae Polychaete *Neoamphitrite edwardsi* Quatrefages, 1865 (Glémarec & Hily, 1979).

Previously, this inconspicuous species was known to be an eastern Atlantic species present from northern Brittany in the Bay of Morlaix to the African coast south of Angola (Udekem d'Acoz, 1999). It also lives in the Western Mediterranean Sea off Banyuls sur Mer (France) (Noël & Amouroux, 1977), as well as along the Algerian coasts (Glémarec & Hily, 1979). Although the first description of this species, based on Moroccan individuals, only occurred in 1932 (see Monod, 1932), it was known to be present in the western English Channel, around Roscoff, since 1921 (Pérez, 1942; Bocquet, 1963; Bourdon, 1965) but remained rare in this northern Brittany location. Thus, during the long-term survey of the 'Rivière de Morlaix' station (10 m depth) in the Bay of Morlaix (Dauvin, 1982, 2000), only three specimens of *A. atlanticus* were sampled: one in February 1980, one in April 1981 and the last one in December 1995.

Otherwise, its presence has also been reported in Cornwall (Costello, 2008), but there is no more detailed publication about this observation. It is consistent with the fact that *A. atlanticus* larvae had been reported in the United Kingdom waters including Scotland (Pan & Hay, 2010). However, Pan & Hay (2010) also indicate that no adult specimen now has been sampled around the British Isles. Hayward & Ryland (1990) reported that the species was

probably present around the Channel Islands, but this has never been confirmed. However, the species has been observed in a sea-grass meadow off Saint-Malo in 2008 (48°38.96'N 02°02.04'W; Grall, personal observation). In the eastern part of the English Channel and the Bay of Seine, this crab has never been observed before December 2008 despite numerous studies that have been implemented since 1970s (Gentil & Cabioch, 1997; Thiébaud *et al.*, 1997; Ghertsos, 2002; Barnay, 2003; Dauvin *et al.*, 2004; Dauvin *et al.*, 2007).

## **Materials and methods**

The observations of *A. atlanticus* have been reported in several studies and monitoring programs. The eastern part of the Bay of Seine is actually the location of many facilities and amenities likely to affect coastal and estuarine environments. This is mainly due to the presence of three ports of international importance: Port of Le Havre, the crude oil terminal in Le Havre-Antifer and the Port of Rouen.

Since 1986, the macrofauna distribution in the eastern Bay of Seine has regularly been established. Winter benthic surveys, especially the PECTOW (PECTinaria OWenia campaign) surveys, organized before the recruitment period of the dominant species, have occurred in 1986, 1987, 1988, 1991, 1996, 2001, 2006 and 2011 (Thiébaud *et al.*, 1997; Barnay, 2003; Dauvin *et al.*, 2007; unpublished data). Today, eight campaigns, with a grid of 40 to 77 stations according to the year, are available. These winter samples were collected using a Hamon grab (0.25 m<sup>2</sup>, about 15 cm depth) with two benthic macrofauna replicates at each station.

In addition, over the last ten years new amenities and projects have increased the need for benthic monitoring: i) Port 2000, or the extension of the Port of Le Havre, ii) the project to implant a Liquid Natural Gas terminal near the crude oil terminal in Le Havre-Antifer, and iii)

the necessity for new dump-sites for dredged material. Consequently, the increasing monitoring efforts have yielded a significant amount of new data concerning the coastal and estuarine benthic communities of the eastern part of the Bay of Seine (Dancie *et al.*, 2010; Dancie, 2011; Laurand *et al.*, 2010; Lanshere *et al.*, 2011). Researchers now have annual, or biannual, data for the area between Antifer and the Seine estuary since 2002. Depending on the year, this is between 48 and 97 stations, which were sampled with a Smith–McIntyre grab (0.10 m<sup>2</sup>, about 10 cm depth), with three benthic macrofauna replicates being collected at each station.

For the Seine Estuary, it appears that one of the main consequences of the huge development projects realized over the last two decades is the silting-up of the shallow waters of the eastern Bay of Seine (Dauvin *et al.*, 2007). In order to understand the mechanism of the silting-up phenomenon, since 2007, the Seine-Aval COLMATAGE program has been run for five years (2007-2011). To define a range of seasonal variations of the benthic macrofauna, two summer surveys were organized in 2008 and 2009 with respectively 58 and 54 stations (Alizier, personal observation). These summer samples were collected using a Van Veen grab (0.10 m<sup>2</sup> about 10 cm depth) with five benthic macrofauna grab samples at each station. For each sampling occasion evoked the last three paragraphs, an additional sample was collected for sediment analysis.

## **Results**

In spite of the regular sampling of the benthic macrofauna in the eastern Bay of Seine since 1970s, we report here the first and repeated captures of specimens of *A. atlanticus* in the eastern part of the Bay of Seine since 2008, especially in Antifer crude oil terminal and off Le Havre (Fig. 1). All *A. atlanticus* specimens (30) were collected between 7 and 25 m depth,



mainly on mud and muddy sands (23 out of 27 stations). The remaining four stations were characterized by sandy sediments (Table 1). The sediment's fine particle content ( $< 63 \mu\text{m}$ ) ranged from 2 % to 99 %. Many of the related macrobenthic assemblages included tubicolous organisms such as the polychaetes *Terebellides stroemi* Sars, 1835 and *Lanice conchilega* Pallas, 1766, and the digging decapod *Upogebia deltaura* Leach, 1815 which were likely to provide suitable habitat for *A. atlanticus* Glémarec & Hily, 1979.

Our specimen size ranged from a width of 2.2 mm to 10 mm. Most of them (24 individuals, 80%), including the non-measured specimens (Dancie, personal communication) were relatively small sized, ranging between a width of 2.2 mm and 4.8 mm (Table 1), and were sexually undetermined. The remaining six individuals, ranging between 5.6 and 10 mm, were one male and five females. According to Bocquet (1965), the male and two females were young specimens in their fourth crab stage of development, while three females were adult specimens. None of these adult females was gravid.

## Discussion

Recently, a collection of *Asthenognathus gallardoi* Serène & Soh, 1976, from Thailand and the Philippines has been examined by Naruse & Clark (2009). These authors proposed to create a new genus for this species: *Gopkittisak*. They also highlighted the need to provide a revision for the Atlantic *Asthenognathus*-like species, and underlined the difficulties for classifying this small group of Crustacea Decapoda. Given the state of the art in this complicated family, we propose to follow the European Register of Marine Species status of *A. atlanticus* (Costello *et al.*, 2008) for the specimens collected in the eastern Bay of Seine. This species is highly distinctive, and thus is unlikely to be overlooked or misidentified. Thus,

we can guarantee that no individual of *A. atlanticus* was collected in the eastern French part of the English Channel before 2008.

The records of *A. atlanticus* in the eastern part of the English Channel show a large distance between the known population in northern Brittany and the new location of this species in the Bay of Seine. However, there is evidence that warm water species such as *A. atlanticus* are now able to extend their ranges into areas where the climate conditions, especially in winter, are milder than in the past (Mieszkowska *et al.*, 2006). Some species have extended their northern and eastern limits in the Channel more than 160 km (Williams, 2007). At least one other brachyuran species, *Pachygrapsus marmoratus* Fabricius, 1787, was known to move eastward along the English Channel (Ingle & Clark, 2006; Dauvin, 2008). Ingle and Clark (2006) argue that the occurrence of *P. marmoratus* in the southern coastal waters of the British Isles is due to climate change and evoke favorable conditions for temporarily sporadic introductions of more southern species from time to time. Thus, in the context of global warming, occasional fluctuations of the environmental factors or short-term climate cycles may also play a preponderant role in the considerable fluctuations of the extreme northern and eastern limits of species (Southward & Southward, 1977).

In addition, *A. atlanticus* is known to live in various types of sediment, from muddy fine sand to mud and from the intertidal zone to depths of 210 m (Glémarec & Hily, 1979; Udekem d'Acoz, 1999). The sediment with fine particles content ( $< 50 \mu\text{m}$ ) greater than 25% corresponds to the optimal habitat for this species around the Brittany (Bocquet, 1963; Glémarec & Hily, 1979). In 2002, the tubicolous ampharetid *Melinna palmata* Grube, 1870 was recorded for the first time in the muddy fine sand *Abra alba* – *Pectinaria koreni* community of the eastern part of the Bay of Seine (Dauvin *et al.*, 2007). This species' occurrence and the consecutive growth of its population reflect the increase in fine particles in this part of the eastern Bay of Seine reported between 2001 and 2011 (Lesourd *et al.*, 2001,

2003; Dauvin *et al.*, 2007, unpublished data). The new records of *A. atlanticus* may then reflect the increase in subtidal mud habitats in the eastern Bay of Seine, as much due to human disturbances as to climatic changes.

Since favorable environmental conditions, which allow this species to survive, seem to be established, the species' presence still raises the question of the causes of its introduction. Either natural or anthropogenic introduction vectors may be involved. Since crustacean larvae can cover large distances, natural migrations could occur via larval dispersal by residual currents. For example, Southward & Southward (1977) have already observed the arrival in Cornwall of the hermit crab *Clibanarius erythropus* Latreille, 1818, from 1955 to 1962 from South Brittany. Experiments conducted in controlled conditions at Roscoff (Brittany, France) by Bocquet (1965) showed that the *A. atlanticus* larval stage lasted about 45 days (6 weeks). Thus, covering the distance between Roscoff and the eastern Bay of Seine ( $\approx 325$  km) over 45 days requires residual currents of  $\approx 8 \text{ cm s}^{-1}$ , which are well above the tidal residual currents of  $\approx 3 \text{ cm s}^{-1}$  reported in most parts of the English Channel (Salomon & Breton, 1993). Only an unusually favorable sequence of moderate and strong western winds over 6 weeks could significantly increase residual currents and encourage such a transport. Although the distance between Saint Malo and the eastern Bay of Seine is shorter ( $\approx 250$  km), the presence of mesoscale eddies in the Saint Malo gulf may increase residence times and limit larval export (Salomon & Breton, 1993; Lefebvre *et al.*, 2003).

Furthermore, the colonization of the eastern Bay of Seine following larval transport of *A. atlanticus* by residual currents, from the western to the eastern English Channel, implies that enough quantities of larvae were released and survived in the plankton for 6 weeks. However, as noted earlier, this species remains rare in the Western Channel. Conversely, such colonization seems likely if we assume that transitional populations of *A. atlanticus* are present in the Channel Islands, along the western and northern Cotentin coasts as well as in

the western Bay of Seine, as is the case for *Melinna palmata*. Thus, *Melinna palmata* was observed in the Cherbourg harbor where the favorable muddy sediment exists, which is likely to host *A. atlanticus* population (Dauvin *et al.*, 2007). However, we have yet to find any other report of the species from these areas, despite the many surveys carried out over the last thirty years (e.g. scientific monitoring programs, benthic environmental surveys, Water Framework Directory controls).

On the other hand, human intervention has frequently been involved in the introduction of non-native species, especially due to aquaculture practices and transportation by ship (Gollasch, 2002). The role of shellfish farming for *A. atlanticus* can be rejected because no activities occur around Antifer. In contrast, Le Havre-Antifer harbor is an important crude oil terminal, designed to accommodate 550,000dwt super-tankers (<http://www.havre-port.fr>; 04/23/2010). Gollasch (2002) has shown that several brachyuran decapods species are found to travel by ship in tank sediments, hull fouling and ballast waters. Actually, many cases of ship-mediated introduction of non-native species have already been described in the English Channel and the North Sea. These ship-mediated cases involve several crab species from various countries (e.g. Japan, China, America) such as *Eriocheir sinensis* Milne Edwards, 1853, *Hemigrapsus sanguineus* de Haan, 1835, *Hemigrapsus takanoi* Asakura and Watanabe, 2005, *Pachygrapsus marmoratus* Fabricius, 1787 and *Rhitropanopeus harrissii* Gould, 1841 (Vincent & Breton 1999; Breton *et al.*, 2002; Vincent & Noël, 2002; Breton, 2005; Ingle & Clark, 2006; Dauvin *et al.*, 2009). In addition, the fact that the reports of *A. atlanticus* in the eastern part of the Bay of Seine came in the vicinity of large harbors (Antifer and Le Havre) leads us to consider ship-mediated introduction as the most likely hypothesis.

We are unable to maintain that individuals of *A. atlanticus* collected near Antifer during December 2008 and 2011 belong to a self-sustaining population. Until now, there is no

evidence of reproduction. The adults observed are really few and even then their presence does not necessarily mean that a self-sustaining population is established (Southward & Southward, 1988).

## **Conclusion**

The presence of *Asthenognathus atlanticus* in the eastern part of the Bay of Seine has been reported out for four consecutive years, from 2008 to 2011. There is no evidence that the specimens collected are part of a self-sustaining population, even if the recent changes in local environment lead to favorable conditions for this species. Since i) there has been no report of this species' presence between Saint Malo and Antifer, and ii) the several observations have come in the vicinity of important harbours, at this time, the most likely hypothesis of these recent observations would be a ship-mediated introduction. Further explorations or existing monitoring programs will need to pay particular attention to this species in order to define its spatial distribution more precisely and to determine whether or not it is self-sustaining. Population genetic analyses, processed on alcohol-preserved specimens that would be sampled directly in the field, would thus be useful to i) understand the introduction history of this species in the eastern Bay of Seine and ii) to re-examine the taxonomic status of this species which seems to be unclear.

## **Acknowledgements**

The Seine-Aval COLMATAGE program is coordinate by the GIP Seine-Aval, a partnership of eleven institutions, and organizations, including Haute Normandie and Basse Normandie Regions; Calvados, Eure and Seine-Maritime Departments, two industrial

associations (UIC and ASICEN), the French national government (*Direction Régionale de l'Environnement*), Seine Normandy Water Agency, the *Grand Port Maritime du Havre* and the *Grand Port Maritime de Rouen*. We are grateful to the *Cellule de Suivi du Littoral Normand* staff, especially Delphie Le Thoer and Thomas Lefrançois; to the crews of the N.O. *Côtes de la Manche*, the *Marais* and the *Flipper*; and to the numerous students for their help in field interventions. We are also grateful to the *Grand Port Maritime du Havre* and to the company *Gaz de Normandie* which allowed us to use of proprietary data. Thanks to L. E. Spencer for her help in correcting the English text.

## References

- Barnay A.S. 2003.** Structure des peuplements de sables fins plus ou moins envasés en Manche : échelles spatiales et biodiversité. Thèse de l'Université Pierre & Marie Curie (Paris VI), 250 pp.
- Bocquet C. 1963.** Remarques morphologiques et systématiques sur le crabe *Tritodynamia atlantica* (Th. Monod) (*Asthenognathus atlanticus* – Th Monod) présent dans la région de Roscoff. *Cahiers de Biologie Marine*, **4**: 65-79.
- Bocquet C. 1965.** Stades larvaires et juvéniles de *Tritodynamia atlantica* (Th. Monod) (*Asthenognathus atlanticus* – Th. Monod) et position systématique de ce crabe. *Cahiers de Biologie Marine*, **6**: 407-419.
- Bourdon, R. 1965.** Inventaire de la faune marine de Roscoff. Décapodes – Stomatopodes. Editions de la Station Biologique de Roscoff, 45 pp.
- Breton G. 2005.** Le Port du Havre (Manche Orientale, France) et ses peuplements : un exemple de domaine paralique en climat tempéré. *Bulletin de la Société Zoologique de France*, **130**: 381-423.

**Breton G., Faasse M., Noël P. & Vincent T. 2002.** A new alien crab in Europe: *Hemigrapsus sanguineus* (Decapoda: Brachyura: Grapsidae). *Journal of Crustacean Biology*, **22**: 184-189.

**Costello M.J., Bouchet P., Boxshall G., Arvanitidis C. & Appeltans W. 2008.** European Register of Marine Species. <http://www.marbef.org/data/erms.php>. Consulted on 2011-06-15.

**Dancie C., Chaignon C., Dubut S., Gesland R., Hanin C., Lanshere J. & Le Thoer D. 2010.** Etude biosédimentaire du port d'Antifer. Campagne Automne 2009. Rapport de synthèse. Rapport CSLN/SAFEGE/Gaz de Normandie, 43 pp + annexes.

**Dancie C. 2011.** Suivi des sédiments et des peuplements benthiques sur le site d'immersion d'Octeville. Rapport scientifique pluriannuel 2010. Rapport CSLN/GPMH, 65 pp + annexes.

**Dauvin J.C. 1982.** Impact of Amoco Cadiz oil spill on the muddy fine sand *Abra alba* and *Melinna palmata* community from the Bay of Morlaix. *Estuarine Coastal Shelf Science*, **14**: 517-531.

**Dauvin J.C. 2000.** The muddy fine sand *Abra alba*-*Melinna palmata* community of the Bay of Morlaix twenty years after the Amoco Cadiz oil spill. *Marine Pollution Bulletin*, **40**: 528-536.

**Dauvin J.C. 2008.** New record of the marbled crab *Pachygrapsus marmoratus* (Crustacea: Brachyura: Grapsoidea) on the coast of northern Cotentin, Normandy, western English channel. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 2 - Biodiversity Records*, published on-line, 3 pp.

**Dauvin J.C., Gomez Gesteira J.L., Gentil F., Ghertsos K., Ropert M., Sylvand B., Thiébaud E. 2004.** Spatial structure of a subtidal macrobenthic community in the Bay of Veys (western Bay of Seine, English Channel). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **307**: 217-235.



- Dauvin J.C., Ruellet T., Thiébaud R., Gentil F., Desroy N., Janson A.L., Duhamel S., Jourde J. & Simon S. 2007.** The presence of *Melinna palmata* (Annelida: Polychaeta) and *Ensis directus* (Mollusca: Bivalvia) related to sedimentary changes in the Bay of Seine (English Channel, France). *Cahiers de Biologie Marine*, **48**: 291-401.
- Dauvin J.C., Tous Rius A. & Ruellet T. 2009.** Recent expansion of two invasive crabs species *Hemigrapsus sanguineus* De Haan, 1853 and *H. takanoi* Asakura and Watanabe, 2005 in the Dover Strait (English Channel, north-eastern Atlantic). *Aquatic Invasions*, **4**: 451-465.
- Gentil F. & Cabioch L. 1997.** Carte des peuplements macrobenthiques de la Baie de Seine et Manche centrale sud. Edition de la Station Biologique de Roscoff. Carte et notice explicative de la carte, 18 pp.
- Ghertsos K. 2002.** Structure spatio-temporelle des peuplements macrobenthiques de la baie de Seine à plusieurs échelles d'observation. Thèse de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 182 pp.
- Glémarec M. & Hily C. 1979.** Nouvelles données sur la répartition de *Tritodynamea atlantica* Balls, 1922. *Cahiers de Biologie Marine*, **20**: 499-505.
- Gollasch S. 2002.** The importance of ship hull fouling as a vector of species introductions into the North Sea. *Biofouling*, **18**: 105-121.
- Hayward P.J. & Ryland J.S. 1990.** *The Marine Fauna of the British Isles and North-West Europe, Volume 1: Introduction and Protozoans to Arthropods*. Clarendon Press, Oxford, 627 pp.
- Ingle R.W. & Clark P. 2006.** First reported occurrences of the marbled crab, *Pachygrapsus marmoratus* (Crustacea: Brachiura: Grapsoidea) in southern coastal waters of the British Isles. *Journal of the Marine Biological Association 2 - Biodiversity Records*, published on-line, 5 pp.

**Lanshere J., Chaignon C., Cramet F., Dubut S., Guillemain M., Hanin C., Le Thoer D. & Mangane A. 2011.** Suivi biologique de l'ancienne souille expérimentale du CNEXO en Baie de Seine - Etude de la faune benthique. Rapport de la campagne de décembre 2010. Rapport CSLN/GPMR, 10 pp + annexes.

**Laurand S., Chaignon C., Dancie C., Dubut S., Lanshere J. & Le Thoer D. 2010.** Suivi des sédiments et des peuplements benthiques de l'estuaire de la Seine : Zone estuaire et dragages d'accompagnement. Rapport de la campagne du printemps 2010. Rapport CSLN/GPMH, 34 pp + annexes.

**Lefebvre A., Ellien C., Davoult D., Thiébaud E. & Salomon J.-C. 2003.** Pelagic dispersal of the brittle-star *Ophiothrix fragilis* larvae in a megatidal area (English Channel, France) examined using an advection-diffusion model. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, **57**: 421-433.

**Lesourd S., Lesueur P., Brun-Cottan J.-C., Auffret J.-P., Poupinet N. & Laignel B. 2001.** Morphosedimentary evolution of the macrotidal Seine estuary subjected to human impact. *Estuaries*, **24**: 940-949.

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

**Mieszkowska N., Kendall M.A., Hawkins S.J., Leaper R., Williamson P., Hardman-Mountford N.J. & Southward A.J. 2006.** Changes in the range of some common rocky shore species in Britain - a response to climate change? *Hydrobiologia*, **555**: 241-251.

**Monod Th. 1932.** *Brachyura maroccana*. I. Pinnotheridae, avec la description d'*Asthenognathus atlanticus* (nov. sp.). *Bulletin de la Société de Sciences Naturelles du Maroc*, **XII (4-6)**: 142-155.

**Naruse, T. & Clark, P. F. 2009.** Establishment of a new genus for *Asthenognathus gallardoi* Serène & Soh, 1976 within Gaeticinae Davie & N.K. Ng, 2007 (Crustacea: Decapoda: Brachyura: Varunidae). *Zootaxa*, **1987**: 61–68.

**Noël P. & Amouroux J.M. 1977.** Sur la présence d'*Asthenognathus atlanticus* Monod 1932 (Crustacea, Brachyura) dans la région de Banyuls sur Mer (Méditerranée). *Vie et Milieu* **XVII**, **1**, ser. A: 135-136.

**Ng P.K.L., Guinot D. & Davie P.J.F. 2008.** Systema brachyurorum: Part. I. An annotated checklist of extant brachyuran crabs of the world. *Raffles Bulletin of Zoology*, Supplement, **17**: 1-286.

**Pan, M. & Hay. S. 2010.** Decapod crustacean larvae of Scottish coasts. A photographic identification guide (excluding infraorder Brachyura). Scottish Marine and Freshwater Science. Marine Scotland Science Report, Aberdeen, UK, 103 pp.

**Pérez Ch. 1942.** Un crabe nouveau pour la faune de France capturé à Roscoff, *Asthenognathus atlanticus*. *Bulletin de la Société Zoologique de France*, **67**: 152.

**Salomon J.-C. & Breton M. 1993.** An atlas of long-term currents in the Channel. *Oceanologica Acta*, **16**: 439-448.

**Southward A.J. & Southward E.C. 1977.** Distribution and ecology of the hermit crab *Clibanarius erythropus* in the western Channel. *Journal of the Marine Biology Association of the United Kingdom*, **57**: 441-452.

**Southward A.J. & Southward E.C. 1988.** Disappearance of the warm-water hermit crab *Clibanarius erythropus* from south-west Britain. *Journal of the Marine Biology Association of the United Kingdom*, **68**: 409-412.

**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

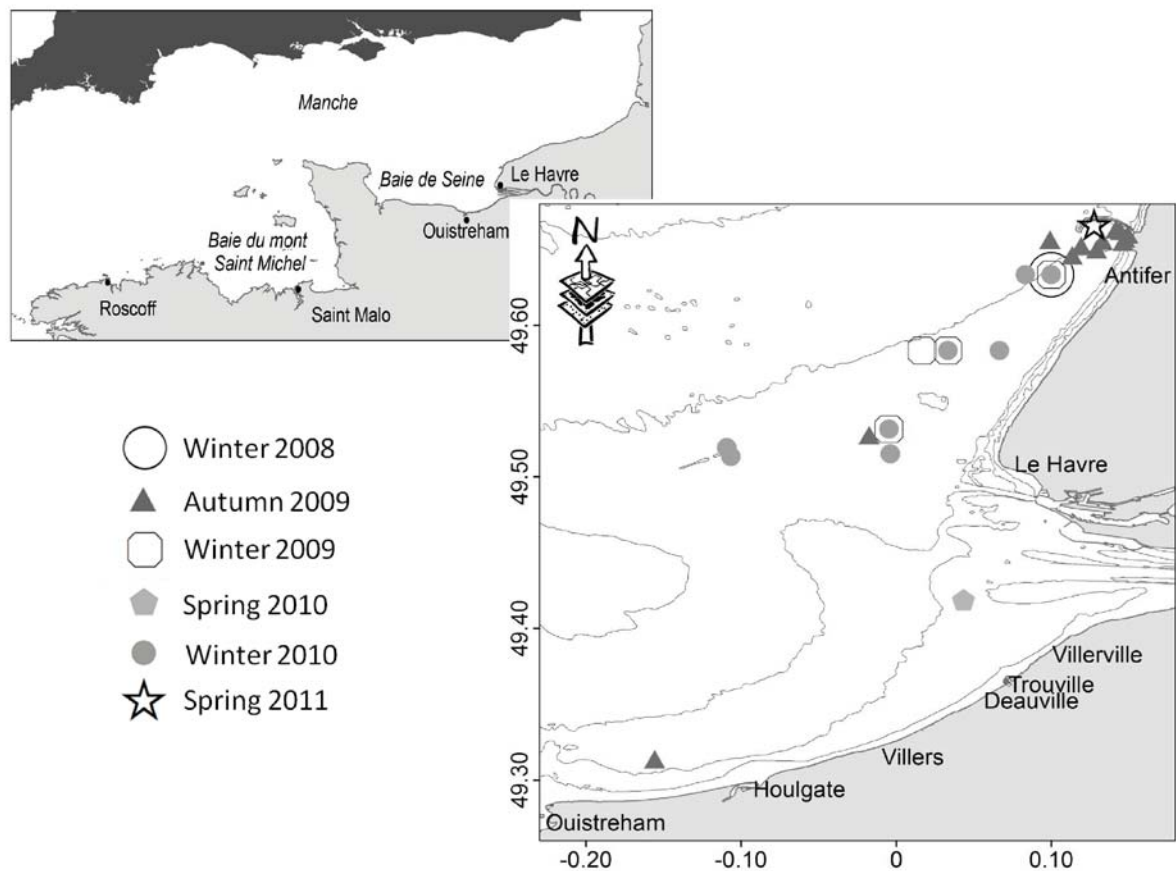
Bay of Seine. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, **77**: 1165-1185.

**Udekem d'Acoz C. d'** 1999. *Inventaire et distribution des crustacés décapodes de l'Atlantique nord-oriental, de la Méditerranée et des eaux continentales adjacentes au nord de 25°N*. Collections Patrimoines Naturels, Museum National d'Histoire Naturelle, Paris **40**: 1-383.

**Vincent T. & Breton G.** 1999. Présence du crabe *Hemigrapsus penicillatus* de Haan, 1835 dans les bassins du port du Havre (Normandie, France) en 1997. *Bulletin trimestriel de la Société Géologique de Normandie et des Amis Muséum du Havre*, **86**: 19-23.

**Vincent T. & Noël P.** 2002. Les Mysidacés et Décapodes capturés, collectés et observés entre 1978 et 2000 dans le port du Havre (Seine-Maritime, France). *Bulletin trimestriel de la Société Géologique de Normandie et des Amis Muséum du Havre* **87**: 71-91.

**Williams N.** 2007. Climatic change rises on the 2007 Agenda. *Current Biology*, **17**: R38–R39.



**Figure 1:** Map of the sampling stations where *Asthenognathus atlanticus* was collected in the Eastern part of the Bay of Seine.

**Figure 1 :** Carte des stations de la partie orientale de la baie de Seine au niveau desquelles *Asthenognathus atlanticus* a été échantillonné.

**Table 1:** Main characteristics of the sampling location where *Asthenognathus atlanticus* individuals were collected from 2008 to 2011 (Coordinates WGS84; ND: no data).

**Tableau 1 :** Principales caractéristiques des stations où *Asthenognathus atlanticus* a été échantillonné entre 2008 et 2011 (coordonnées WGS84 ; ND : absence de donnée).

Date	Campaign	X	Y	Ni	Sediment (Folk diagram)	Width (mm)
16/12/08	OCTEVILLE	0°01.00'E	49°38.00'N	2	Sandy mud	2.8 ; 3.2
27/08/09	COLMATAGE	0°01.14'W	49°31.62'N	1	Muddy sand	10.0
01/09/09	COLMATAGE	0°09.30'W	49°18.82'N	1	Muddy sand	9.8
23/09/09	ANTIFER	0°08.50'E	49°39.81'N	1	Sandy mud	6.6
23/09/09	ANTIFER	0°08.54'E	49°39.61'N	1	Muddy sand	3.4
23/09/09	ANTIFER	0°08.78'E	49°39.31'N	1	Sandy mud	5.6
23/09/09	ANTIFER	0°08.67'E	49°39.73'N	1	Sandy mud	2.4
23/09/09	ANTIFER	0°07.98'E	49°39.35'N	1	Sandy mud	2.2
23/09/09	ANTIFER	0°07.75'E	49°39.02'N	1	Sandy mud	3.1
24/09/09	ANTIFER	0°08.84'E	49°39.45'N	1	Sandy mud	2.6
24/09/09	ANTIFER	0°07.15'E	49°39.14'N	1	Sandy mud	7.5
24/09/09	ANTIFER	0°05.94'E	49°39.39'N	1	Sand	2.2
24/09/09	ANTIFER	0°06.80'E	49°38.78'N	1	Sandy mud	3.2
15/12/09	OCTEVILLE	0°01.00'E	49°35.00'N	1	Muddy sand	3.9
15/12/09	OCTEVILLE	0°02.00'E	49°35.00'N	1	Sandy mud	4.8
15/12/09	OCTEVILLE	0°06.00'E	49°38.00'N	1	Muddy sand	4.8
15/12/09	OCTEVILLE	0°00.28'W	49°31.88'N	1	Sandy mud	3.7
21/04/10	ESTUAIRE	0°02.60'E	49°25.13'N	1	Sandy mud	ND
19/11/10	OCTEVILLE	0°04.00'E	49°35.00'N	1	Sandy mud	ND
19/11/10	OCTEVILLE	0°00.23'W	49°30.90'N	2	Muddy sand	ND
19/11/10	OCTEVILLE	0°00.28'W	49°31.88'N	2	Muddy sand	ND
19/11/10	OCTEVILLE	0°02.00'E	49°35.00'N	1	Sandy mud	ND
03/12/10	OCTEVILLE	0°05.00'E	49°38.00'N	1	Sand	ND
03/12/10	OCTEVILLE	0°06.00'E	49°38.00'N	1	Muddy sand	ND
21/12/10	CNEXO	0°06.40'W	49°30.80'N	1	Sand	ND
21/12/10	CNEXO	0°06.56'W	49°31.15'N	1	Sand	ND
13/03/11	PECTOW	0°07.88'E	49°39.63'N	1	Muddy sand	9.0

## RESUME

Alors qu'à l'échelle de la Manche comme de la baie de Seine Orientale, il a été montré que la granulométrie des sédiments, elle-même influencée par l'intensité des courants de marée, était le facteur principal de structuration de la faune, les études qui se sont placées à l'échelle de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* (caractéristique des fonds sablo-vaseux de la baie de Seine Orientale) ou encore à celle de la communauté à *Macoma balthica* (caractéristique des fonds envasés à l'embouchure), se sont heurtées à la difficulté de mettre en avant des relations claires entre les assemblages faunistiques et la nature des sédiments. L'étude des relations entre la structuration de la macrofaune benthique et les caractéristiques granulométriques d'un ensemble sédimentaire sablo-vaseux s'avère complexe en milieu côtier anthropisé, sous l'influence d'une dynamique estuarienne, d'un régime de marée mégatidale et de la houle, le tout s'exprimant à des échelles spatio-temporelles variées.

Située à l'échelle du système "baie de Seine Orientale – embouchure", mon approche s'est basée sur l'observation de la reproductibilité de phénomènes ou de constats pour à la fois dégager les schémas généraux de son organisation et en trouver les facteurs structurants principaux. Une synthèse des travaux antérieurs relatifs à l'étude de la structuration et l'organisation du compartiment benthique, une revisite des données historiques (campagnes PECTOW (1988-1991-1996-2001-2006)) ainsi que l'analyse des données nouvellement acquises (campagnes COLMATAGE (2008-2009)), ont permis d'offrir un point de vue de l'organisation générale du compartiment benthique (macrofaune et sédiments) au sein du système "baie de Seine Orientale – embouchure". Deux schémas synthétiques de l'organisation de la macrofaune benthique en "spots" d'abondance et de richesse spécifique, et de l'organisation sédimentaire dans le contexte hydrodynamique et anthropique à cette échelle sont proposés. Leur superposition montre que les processus hydrodynamiques régis à la fois (i) 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 (ii) à l'échelle des processus de sédimentation de matériaux fins en "pieds de bancs" localisés à l'embouchure ; apparaissent comme les facteurs de structuration principaux, communs à la macrofaune benthique et aux sédiments.

En parallèle, une étude de la texture sédimentaire, basée sur l'analyse photographique de tous les échantillons prélevés lors des campagnes COLMATAGE, a permis de dégager une problématique majeure concernant le protocole d'échantillonnage des sédiments, en relation avec une hétérogénéité sédimentaire pouvant s'exprimer à des échelles réduites (réplicat, station). Cette hétérogénéité est à relier à la texture sédimentaire, caractérisée en certaines zones par des mélanges sablo-vaseux plus ou moins cohésifs sur lesquels peuvent transiter des sédiments plus sableux. 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.

Les résultats d'une analyse des assemblages faunistiques, réalisée sur les données récentes à l'échelle du système "baie de Seine Orientale – embouchure", tendent en faveur d'un envasement des fonds subtidiaux au sein de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni* par rapport à la situation des années 1970. Un "assemblage frontal", dont certaines espèces vasicoles comme *Melinna palmata* et *Corbula gibba* sont caractéristiques, a été identifié.

Une approche plus spécifique a permis de définir la "niche sédimentaire" des espèces, sur la base de données granulométriques, et de mettre en évidence, à partir des données historiques et récentes, des espèces indicatrices d'un bilan positif de l'envasement sur le long terme, à l'échelle de la communauté à *Abra alba* – *Pectinaria koreni*. 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 la prolifération de 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.

Les 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", ont permis de proposer quelques recommandations pour une stratégie d'observation à long terme du compartiment benthique.