LABORATOIRE DE GEOMORPHOLOGIE DYNAMIQUE
ET AMENAGEMENT DES LITTORAUX (E.A. 3599)
DUNKERQUE

PROCESSUS DE SEDIMENTATION FINE EN MILIEU ESTUARIEN MACROTIDAL : APPROCHE TRANS-DISCIPLINAIRE ET PLURI-2CHELLES ; APPLICATION A L'ESTUAIRE DE L'AUTHIE, NORD DE LA FRANCE

THESE DE DOCTORAT DE GEOGRAPHIE PHYSIQUE

Présentée par

Claire MARION

Soutenue publiquement à DUNKERQUE - décembre 2007 devant un jury composé de :

Pr Edward ANTHONY, *Université d'Aix-Marseille, Directeur de thèse*
Pr Alain TRENTESAUX, *Université des Sciences et Technologies de Lille, Co-directeur de thèse*
Pr Mireille PROVANSAL, *UMR CNRS 6635 CEREGE, Université d'Aix Marseille*
Pr Andrew B. CUNDY, *School of Environment and Technology, Brighton University*
Pr Hervé REGNAULD, *UMR CNRS 6554 COSTEL, Université de Rennes 2*
Dr Bernard SYLVAND, *UMR CNRS 6143 M2C, Université de Caen*

INTRODUCTION **1**

****

CHAPITRE I :

ASPECTS GENERAUX ET PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

****

INTRODUCTION **10**

1. DEFINITIONS ET CLASSIFICATIONS DES ESTUAIRES **10**

.1. VERS UNE DEFINITION INTEGREE DES ESTUAIRES **10**

.1.1. PLURIDISCIPLINARITE DES DEFINITIONS 10

.1.2. DEFINITION GLOBALE OU UNIQUE ? 12

.2. CLASSIFICATIONS DES ESTUAIRES **12**

.2.1. CLASSIFICATIONS HYDRODYNAMIQUES DES ESTUAIRES 13

.2.1.1. Selon le marnage

.2.1.2. Selon l'importance relative du frottement et de la convergence

.2.1.3. Selon l'asymétrie des marées

.2.2. CLASSIFICATIONS GEOMORPHOLOGIQUES DES ESTUAIRES 15

.2.2.1. Selon la topographie

.2.2.2. Classification dynamique ou évolutive

.2.2.3. Selon la morphologie

.2.2.4. Classification morphogénétique

.2.3. CLASSIFICATIONS HYDROLOGIQUES DES ESTUAIRES 21

.2.3.1. Bases conceptuelles

.2.3.2. Paramétrisation à une et deux dimensions

.3. DISCUSSION SUR LES DEFINITIONS ET LES CLASSIFICATIONS 26

.3.1. DE LA NECESSITE D'UNE DEFINITION INTEGREE 27

.3.2. VERS UNE CLASSIFICATION ECOLOGIQUE DES ESTUAIRES 28

.3.3. PERSPECTIVES DE PREDICTION 29

2. LES SEDIMENTS FINS EN DOMAINE ESTUARIEN 30

2.1. ORIGINES ET CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS FINS 30

2.2. TRANSPORT DES SEDIMENTS FINS 32

2.2.1. LES MATIERES EN SUSPENSION (MES) 32

2.2.2. LE MAXIMUM DE TURBIDITE 34

2.3. SEDIMENTATION FINE SUR LES ESPACES INTERTIDAUX 36

3. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE : L'ESTUAIRE DE L'AUTHIE 39

3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE GENERAL 39

3.1.1. GEOLOGIE 39

3.1.2. MORPHOLOGIE CÔTIERE 40

3.2. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES GENERALES 42

3.2.1. LE VENT 42

3.2.2. LA HOULE 43

3.2.3. LA MAREE 45

3.2.4. IMPACTS SUR LES TRANSITS SEDIMENTAIRES A LONG TERME 46

3.3. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'ESTUAIRE DE L'AUTHIE 48

3.4. UN SITE ATELIER 50

CONCLUSION 51

****

CHAPITRE II :

APPROCHE METHODOLOGIQUE ET TECHNIQUES D'ETUDE

****

INTRODUCTION 52

1. APPROCHE PLURI-ECHELLE 52

1.1. DIVERSITE SPATIALE ET TEMPORELLE 52

1.2. PLURIDISCIPLINARITE 54

2. TECHNIQUES D'ETUDE 56

2.1. GEORENCEMENT ET TOPOGRAPHIE 56

2.2.1. TACHEOMETRE 56

2.2.2. DGPS 57

2.2.3. LIDAR 57

2.2. CARACTERISTIQUES DU SEDIMENT 60

2.2.1. GRANULOMETRIE 60

2.3.1.1. Bases théoriques

2.3.1.2. Protocole expérimental

2.3.1.3. Paramètres granulométriques

2.3.1.4. Vers une qualification du milieu de dépôt et des tendances de transport sédimentaire

2.2.2. COMPOSITION 66

2.3.2.1. Matière organique

2.3.2.2. Carbonates

2.3.2.3. Argiles

2.2.3. RHEOLOGIE 68

2.3. ACQUISITIONS HYDRODYNAMIQUES 69

2.3.1. INSTRUMENTATION 69

2.3.1.1. S4 ADW (INTEROCEAN SYSTEMS)

2.3.1.2. Workhorse Sentinel ADCP 1200KHz (RD INSTRUMENTS)

2.3.1.3. Vector ADV 6MHz (NORTEK AS)

2.3.2. PARAMETRES DE LA MAREE 73

2.3.3. PARAMETRES DE LA HOULE 75

2.3.4. HOMOGENEITE DES DONNEES 75

2.4. HYDROLOGIE, CARACTERISATION ET QUANTIFICATION DES MES 76

2.4.1. ECHANTILLONNAGE ET HYDROLOGIE 76

2.4.2. QUANTIFICATION ET CARACTERISATION DES MES 77

2.4.2.1. Quantification par pesée

2.4.1.2. Acquisitions optiques : OBS et ASM-IV

2.4.1.3. Granulométrie *in situ*

2.4.1.4. Dosage des métaux et des éléments particulaires

2.4.3. SUIVI DU TRANSPORT DE MES 85

2.5. QUANTIFICATION DE LA SEDIMENTATION 87

2.5.1. APPORTS 87

2.5.2. ACCRETION 88

2.5.3. ELEVATION 89

2.6. AGENCEMENT DES CORPS SEDIMENTAIRE ET DATATION 91

2.6.1. STRATIGRAPHIE 91

2.6.1.1. Sondages

2.6.1.2. Lithologie et description des faciès

2.6.1.3. Radiographie

2.6.2. APPORTS DE LA GEOPHYSIQUE 93

2.6.2.1. Sismique très haute résolution

2.6.2.2. Géoradar

2.6.3. AGE DES HORIZONS SEDIMENTAIRES 97

2.6.3.1. Méthode cartographique

2.6.3.2. Datation isotopique

2.7. ANALYSES SPATIALES 100

2.7.1. RECTIFICATION DE PHOTOGRAPHIES AERIENNES 100

2.7.2. ANALYSES SOUS SIG 103

2.8. IMPLICATIONS ECOLOGIQUES 105

CONCLUSION 106

****

CHAPITRE III :

MORPHODYNAMIQUE GENERALE DE L'ESTUAIRE DE L'AUTHIE

****

INTRODUCTION 107

1. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES 107

1.1. MORPHOLOGIE GENERALE 107

1.2. TOPOGRAPHIE DE L'ESTUAIRE 109

1.2.1. L'EMBOUCHURE 109

1.2.2. L'ESTUAIRE MOYEN 112

1.2.3. LA RIVE NORD 115

1.3. ESTRANS ET CHENAUX 117

1.3.1. LES PLAGES ESTUARIENNES ET LES VASIERES 118

1.3.2. LES MARAIS SALES 124

1.3.3. LES CHENAUX 132

2. COMPORTEMENT DE LA HOULE ET SIGNATURE DE L'ONDE TIDALE A TRAVERS L'ESTUAIRE 135

2.1. ETUDE DE LA HOULE 136

2.2. ETUDE DE L'ONDE TIDALE 138

2.2.1. LE PRISME TIDAL 138

2.2.2. PROPAGATION DE L'ONDE TIDALE 139

2.3. INETRACTIONS ENTRE MORPHOLOGIE ET ASYMETRIE TIDALE 150

CONCLUSION 151

****

CHAPITRE IV :

ETUDES HYDROSEDIMENTAIRES A L'ECHELLE DE LA MAREE

****

INTRODUCTION 152

1. HYDROLOGIE GENERALE 152

1.1. DONNEES EXISTANTES 152

1.2. MESURES IN SITU 153

1.2.1. CHENAL PRINCIPAL 153

1.2.2. CHENAL DE MAREE 155

1.2.3. SYNTHESE DES OBSERVATIONS 156

1.3. COMPORTEMENT DE QUELQUES ELEMENTS DISSOUS 158

1.3.1. MATIERE MINERALE 159

1.3.2. MATIERE ORGANIQUE 162

2._ ETUDES HYDROSEDIMENTAIRES FINES 167

2.1. CHENAUX ESTUARIENS 167

2.1.1. CHENAL PRINCIPAL 167

2.1.2. CHENAL DE MAREE 168

2.1.1.1. Sans débordement

2.1.1.2. Avec débordement

2.2. ZONES INTERTIDALES 171

2.2.1. MARAIS SALES 171

2.2.1.1. Avec microfalaise d'érosion

2.2.1.1. Avec transition progradante

2.2.2. VASIERE PRINCIPALE 174

2.3. SYNTHESE DES OBSERVATIONS 175

3._ ETUDES DES TRANSFERTS DE SEDIMENTS 178

CONCLUSION 182

****

CHAPITRE V :

SUIVI SEDIMENTAIRE DU CYCLE SEMI-LUNAIRE

A L'ECHELLE ANNUELLE

****

INTRODUCTION 183

1. CHOIX DES SITES EXPERIMENTAUX 183

2. FLUX DE MES EN SUSPENSION 185

2.1. PRECISIONS SUR LA METHODE 185

2.2. RESULTATS 186

3. APPORTS SUR LES MARAIS 188

3.1. PRECISIONS SUR LA METHODE 188

3.2. RESULTATS 189

4. ACCRETION D'UNE VASIERE INTERNE 195

4.1. PRECISIONS SUR LA METHODE 195

4.2. RESULTATS 195

5. ALTIMETRIE DU SCHORRE 197

5.1. PRECISIONS SUR LA METHODE 197

5.2. RESULTATS 198

4. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE 200

4.1. PRECISIONS SUR LA METHODE 200

4.2. RESULTATS 200

CONCLUSION 205

****

CHAPITRE VI :

PLACE DE LA SEDIMENTATION FINE DANS LE CONTEXTE DE REMPLISSAGE GENERAL ET D'EVOLUTION À MOYEN TERME

****

INTRODUCTION 206

1. STRATIGRAPHIE DES DEPOTS 206

1.1. DESCRIPTION MACROSCOPIQUE DES SONDAGES 206

1.1.1. LITHOLOGIE 207

1.1.2. LITAGES 207

1.1.3. FAUNE ET FLORE 210

1.2. INTERPRETATION DES FACIES RENCONTRES 211

1.2.1. FACIES SUPRATIDAL 213

1.2.2. FACIES INTERTIDAL SUPERIEUR 213

1.2.3. FACIES INTERTIDAL MOYEN 214

1.2.4. FACIES INTERTIDAL INFERIEUR 214

1.2.5. FACIES DE CHENAL 214

1.3. COUPES STRATIGRAPHIQUES 215

1.3.1. GENERALITES 215

1.3.2. COUPE LONGITUDINALE 219

1.3.3. COUPE TRANSVERSALE 1 (AVAL) 220

1.3.4. COUPE TRANSVERSALE 2 (INTERNE) 222

1.3.5. COUPE TRANSVERSALE 3 (AMONT) 224

1.4. ETUDES SPECIFIQUES SUR LES CHENAUX ESTUARIENS 226

1.4.1. STRUCTURES SEDIMENTAIRES LIEES AUX CHENAUX 226

1.4.2. ETUDE DES PALEOCHENAUX 227

1.4.3. ETUDE DU CHENAL PRINCIPAL 230

2. DATATIONS ET RYTHMES DE SEDIMENTATION 232

2.1. SONDAGE 7 233

2.2. SONDAGE 34 236

2.3. SONDAGE 25 238

2.4. SONDAGE G 239

3. EVOLUTION DES UNITES GEOMORPHOLOGIQUES 240

3.1. EVOLUTION DU DOMAINE DE L'EMBOUCHURE 240

3.2. EVOLUTION DU CHENAL PRINCIPAL 242

3.3. EVOLUTION DU SCHORRE 244

CONCLUSION 246

****

CHAPITRE VII :

SYNTHESE GENERALE

****

INTRODUCTION 247

1. METHODOLOGIE APPLIQUEE AUX ESPACES ESTUARIENS MIXTES 247

2. PROCESSUS DE SEDIMENTATION FINE A COURT TERME 252

3. AJUSTEMENTS MORPHODYNAMIQUES ET COMBLEMENT 254

4. IMPLICATIONS ECOLOGIQUES 259

CONCLUSION 261

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 262

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 266

LISTE DES FIGURES 294

LISTE DES TABLEAUX 316

ANNEXES

INTRODUCTION

Les estuaires : aperçu général

Les estuaires sont des environnements littoraux très répandus le long des côtes du monde. Situés aux embouchures des fleuves, leur forme et extension sont altérées de façon permanente par l'érosion et le dépôt de sédiments et par les variations du niveau de la mer (eustatique) et/ou du continent (isostatique). La durée de vie des estuaires est généralement courte à l'échelle géologique, leur occurrence actuelle est liée à la récente variation eustatique, la transgression flandrienne (Dalrymple et Choi, 2007).

Etymologiquement, le mot « estuaire » vient de la racine latine « *aestus* » qui signifie marée. Entre continent et océan, lieux d'interaction entre l'eau douce et l'eau salée, les estuaires sont des lieux d'interface par excellence où les gradients spatiaux sont très marqués. Les milieux estuariens sont donc complexes par essence en raison du grand nombre de facteurs intervenant dans leur fonctionnement ainsi que de leurs nombreuses interactions.

Les estuaires ont été historiquement une voie privilégiée par l'Homme en raison des nombreux avantages qu'ils offrent. Aussi, ce sont de nos jours des lieux de concentration de population importante où les activités humaines sont très diversifiées (navigation, tourisme, chasse, pêche à pied…). Cette pression anthropique forte et grandissante exacerbe les problèmes liés à la dégradation de l'environnement côtier en général. Les problématiques rencontrées en termes de gestion du territoire et des ressources naturelles sont extrêmement diverses. L'aménagement de ces espaces, sujets à de nombreux conflits d'usage, se révèle particulièrement délicat : il doit notamment composer avec leur dynamique sédimentaire (problèmes d'érosion et de comblement) tout en tenant compte des enjeux économiques (poldérisation, chenalisation). De par leur capacité d'accueil sédimentaire, les estuaires se comportent notamment comme de véritables piéges à polluants (rejets industriels et agricoles du bassin versant, pollution d'origine marine…). Cette situation peut devenir préoccupante pour la pérennité de leurs fonctions écologiques (hivernage des oiseaux migrateurs, nourricerie de poissons…).

L’estuaire de l’Authie

L’estuaire de l’Authie, au centre de nos travaux, est un site encore peu aménagé mais soumis à l’ensemble des pressions décrites ci-dessus et porteur de préoccupations inhérentes sur son devenir. Il fait partie des espaces littoraux soumis à de très forts marnages (supérieurs à 6 m) ce qui lui confère sa première spécificité en raison de la faible occurrence de ce type de milieu. Les côtes présentant ce type d’amplitude tidale sont appelées mégatidales, terme encore peu usité cependant en ce qui concerne les estuaires (Figure 0.1) et auquel de nombreux auteurs préfèrent macrotidales (marnages supérieurs à 4 m).

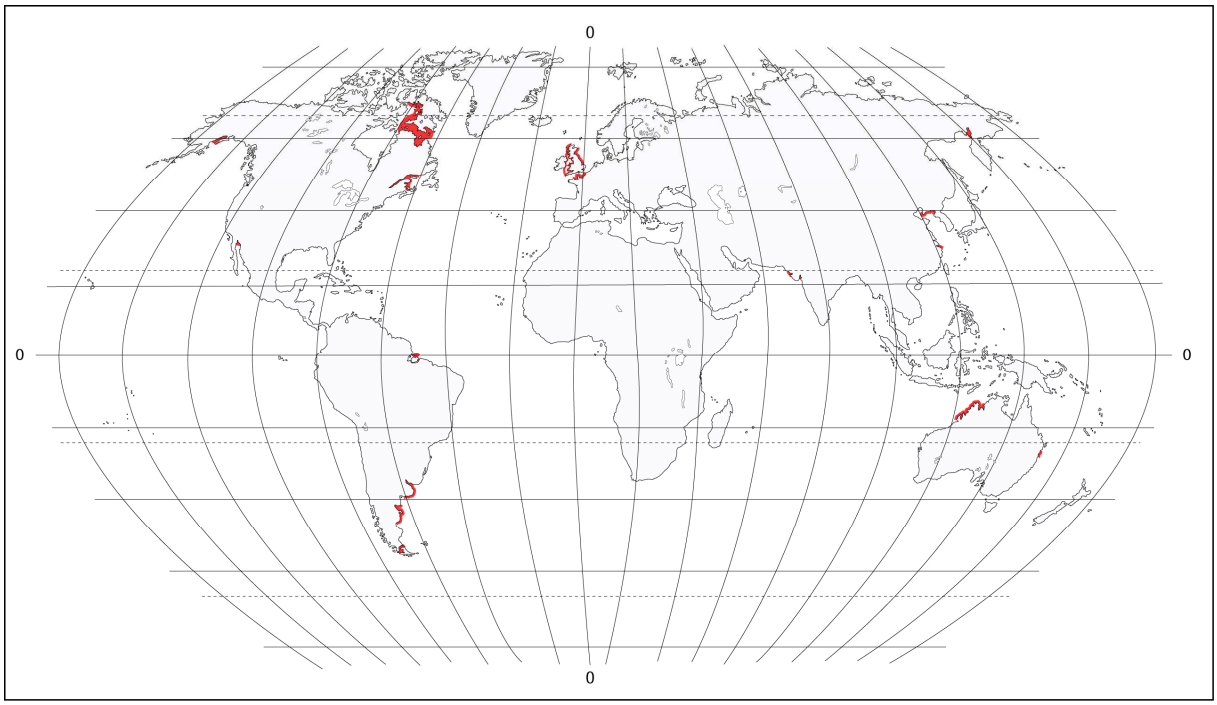


Figure 0.1. Répartition mondiale des littoraux mégatidaux (en rouge) d’après Levoy *et al*. (2000).
Figure 0.1. *World distribution of megatidal coasts (in red) from Levoy et al. (2000).*

Cependant à cette influence tidale extrême s’ajoute une action tout aussi intense de la houle en raison de la fréquence des vagues de tempêtes. Anthony et Orford (2002) ont proposé une synthèse des caractéristiques de ces littoraux qui se placent dans des contextes méso à mégatidaux et présentant des hauteurs significatives de la houle entre 0 et 2 m avec une fréquence de 50 % (Figure 0.2). Cette intensité et mixité des agents dynamiques en action confèrent à cet estuaire des particularités tout à fait intéressantes d’un point de vue

morphologique mais également une capacité d'évolution rapide. En effet, ce contexte énergétique mixte favorise l'apport massif de sédiments dans ce système estuarien.

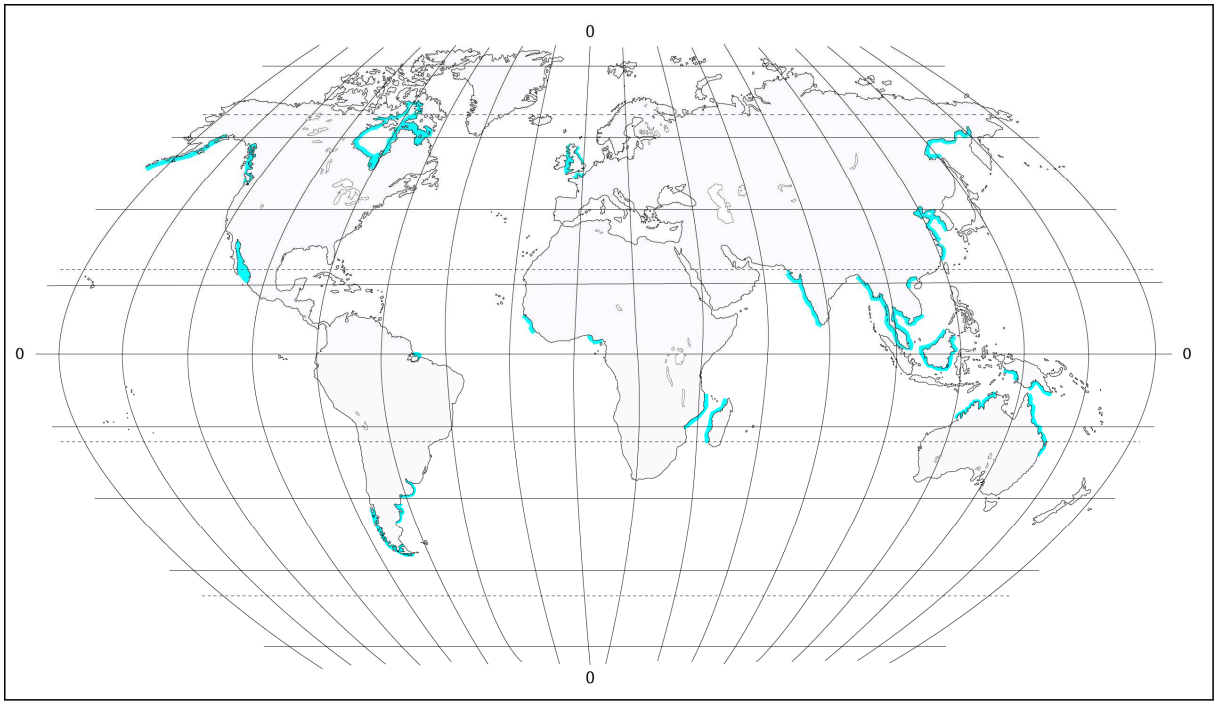


Figure 0.2. Répartition mondiale des côtes mixtes co-dominées par la houle et la marée (en bleu) d'après Anthony et Orford (2002).

Figure 0.2. *World distribution of mixed wave-tide-dominated coasts (WTD coasts) (in blue) from Anthony and Orford (2002).*

Les sédiments qui transitent dans l'estuaire ont deux sources différentes, l'une marine et l'autre fluviale. Cependant, une partie non négligeable provient aussi du remaniement des dépôts à l'intérieur du système. Ces sédiments sont composés de sables marins et de particules fines provenant des deux sources décrites. Les sables se déplacent préférentiellement par charriage sur le fond en raison de leurs propriétés, les sédiments les plus fins sont présents dans la totalité de la colonne d'eau ce qui leur permet un transport sur de plus longues distances. Ces caractéristiques distinctes font que les particules fines se déposent sur les hauts niveaux présentant un caractère abrité vis-à-vis des principaux agents dynamiques. Les surfaces envasées offrent un substrat meuble, riche en matière organique, qui va profiter à l'installation d'une faune très particulière, adaptée à cet environnement physiquement contraignant et donc parfois peu diversifiée. Ces organismes vont cependant atteindre de très fortes densités et fournir ainsi des ressources alimentaires importantes et essentielles pour l'ensemble du réseau trophique. Une fois que ces dépôts atteignent une élévation suffisante,

qui détermine les durées d'inondation de ces aires, des végétaux supérieurs possédant une forte halo-tolérance vont pouvoir s'installer. Cette colonisation primaire qui représente le stade initial de l'édification d'un marais salé fait place ensuite à l'apparition progressive d'un cortège végétal plurispécifique. Au cours de l'évolution (ou maturation) des marais salés, la zone dite pionnière progresse vers un contexte plus ouvert et l'arrière marais, encore inondé de temps à autre, continue d'évoluer vers un système terrestre. Les marais salés tempérés et leurs équivalents tropicaux, les mangroves, sont très largement répartis à la surface du globe comme on peut le constater en Figure 0.3. La compréhension du fonctionnement des aires de sédimentation fine est donc de première importance d'un point de vue écologique mais également socio-économique.

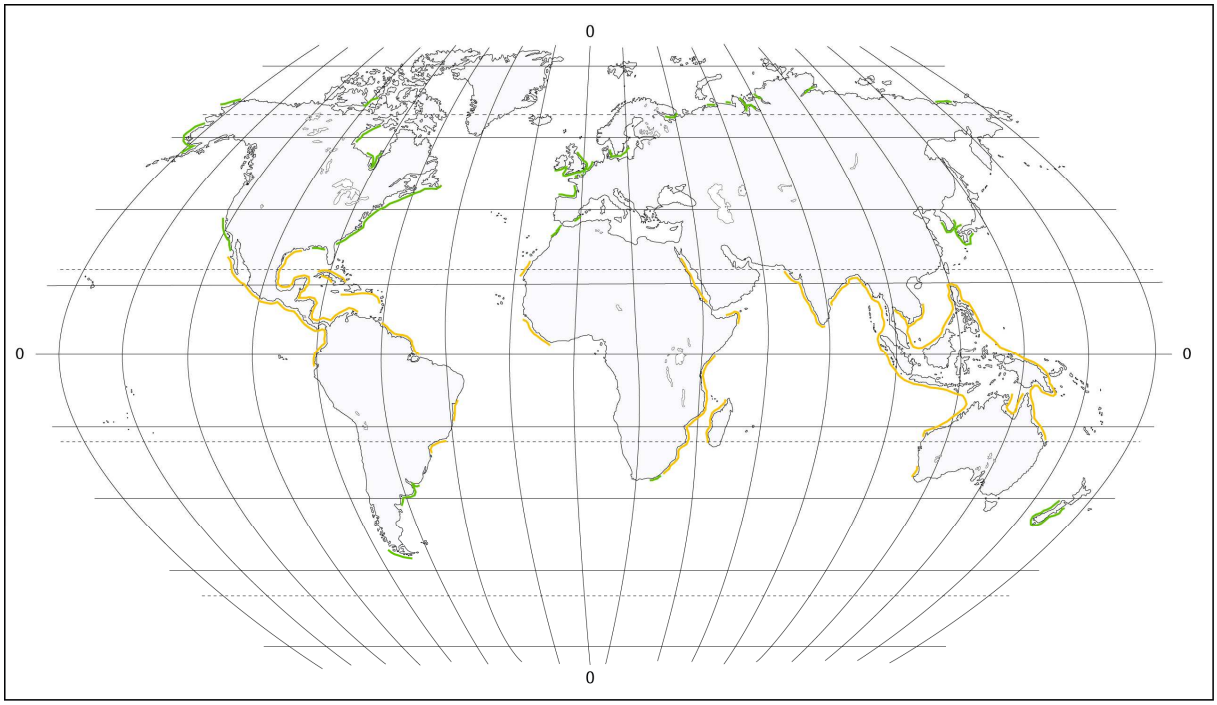


Figure 0.3. Répartition mondiale des marais salés tempérés (en vert) et des mangroves (en jaune) d'après web *Encyclopædia Britannica* (1997).

Figure 0.3. *World distribution of temperate salt marshes (in green) and mangrove swamps (in yellow) from web Encyclopædia Britannica (1997).*

Justification de l'étude

Sur un plan scientifique, la diversité des formes et des dépôts estuariens à travers des gradients très marqués ainsi que la multiplicité des processus qui animent la dynamique estuarienne font que ces embouchures constituent par excellence un champ pluridisciplinaire de recherche fondamentale et appliquée. Cette pluridisciplinarité repose sur un socle qui se décline de plusieurs manières : stocks sédimentaires d'origine marine et terrestre, potentiel de stockage et de relargage de polluants piégés avec les sédiments, gamme de particulaires allant d'argiles fines à des graviers, sédiments biogènes et inorganiques, contribution d'aspects physiques et biologiques, dynamique triptyque axée sur l'action fluviale, de la marée et de la houle, juxtaposition d'intérêts anthropiques marqués. Cette complexité est plutôt unique et par exemple sur le plan du champ très fécond en terme de recherche future entre des interactions physiques et biologiques (Renschler *et al.*, 2007), les estuaires occupent une place de choix. Puits sédimentaires importants, les estuaires sont des enregistreurs remarquables de l'histoire de l'environnement, durant l'Holocène en particulier, mais également des interfaces à même de concentrer à la fois les pollutions d'origine marine et celles issues du bassin versant.

Les soucis de recherche pluridisciplinaire sur la thématique de l'environnement ont ainsi conduit à l'émergence d'un thème « estuaires » dans le cadre de deux programmes distincts : le programme de recherche 'environnement' du Contrat de Plan Etat - Région Nord-Pas-de-Calais (CPER) 2000-2006 et le programme européen INTERREG III RIMEW. Ces deux projets de recherche ont été menés parallèlement sur la période 2000-2007. Le premier est intitulé « *Dynamique et évolution d'un estuaire macrotidal tempéré et de ses abords côtiers : l'Authie, approche pluridisciplinaire et multi-échelle* » et le second « Rives-Manche Estuarine Watch ». Le projet INTERREG III, mené sur la période 2002-2004, a eu une portée euro-régionale, destinée à examiner des tendances évolutives et les capacités de stockage de polluants de quelques estuaires du sud de l'Angleterre et de la France, dont l'Authie. Dans un premier temps, le projet de recherche du CPER a permis de rassembler deux laboratoires universitaires autour du site de l'Authie à travers des études issues de différents champs disciplinaires : EA 3599 GéoDAL (Géographie physique) et UMR PBDS (Chimie marine, Géologie, Géochimie). Ces deux projets, notamment le projet CPER, ont ainsi contribué à structurer la recherche de plusieurs équipes travaillant avec diverses approches sur la géomorphologie, la dynamique sédimentaire, la caractérisation physique et

géochimique des sédiments et sur les processus hydrodynamiques responsables des mouvements de sédiments en domaine estuarien. Le projet CPER en soi représente un rapprochement d'équipes et débouche déjà sur la constitution d'un réseau de recherche travaillant sur les milieux estuariens et côtiers. Au cours de ce projet, la création d'une collaboration forte entre les partenaires a favorisé des études transdisciplinaires, à travers des expérimentations menées conjointement mais également par le biais de discussions communes autour d'études engagées séparément, permettant de croiser et d'étayer ainsi l'interprétation des résultats obtenus.

Cette thèse s'inscrit donc pleinement dans ce projet. Son objet particulier a été la caractérisation des mécanismes d'évolution actuelle et de sédimentation récente de l'estuaire de l'Authie. Les estuaires de nos côtes, notamment l'Authie, présentent ce paradoxe de subir une accrétion massive (Anthony *et al.*, 2005) alors que plus de 60 % des côtes dunaires de la Somme jusqu'en Belgique reculent, situation inquiétante pour les collectivités, et qui risque de s'aggraver avec la hausse du niveau marin et l'accroissement du nombre et de l'intensité des tempêtes d'Ouest. Les côtes régionales, tout comme la rive nord de l'estuaire, sont aujourd'hui largement en érosion malgré l'importance des stocks sédimentaires au large (Anthony, 2000). En se fixant comme objectif de comprendre les modalités de cette accrétion estuarienne, le projet permettra de mieux connaître la dynamique sédimentaire côtière. Les données issues de la connaissance du comblement et du fonctionnement de cet estuaire peuvent apporter des éléments de compréhension de l'histoire environnementale des côtes du Nord-Pas de Calais et de leur comportement morphosédimentaire actuel et futur. La deuxième partie de ce contrat (2006-2008) s'est plus particulièrement intéressée à la reconstruction paléo-environnementale de la plaine maritime flamande (Mrani-Alaoui, 2006) ainsi qu'à l'étude stratigraphique de la Canche, estuaire présentant de fortes similarités avec l'Authie bien que plus fortement aménagé. De ces deux études complémentaires peuvent émerger des cadres généraux sur le fonctionnement et l'évolution de ces espaces littoraux sensibles.

L'Authie montre des particularités qui offrent des perspectives de recherche originales. Tout d'abord en raison du contexte de co-dominance hydrodynamique mixte marée-houles qui a des répercussions sur la nature du comblement, notamment sur la disposition des surfaces stratigraphiques. Les études menées sur ce site, notamment par Dobroniak (2000), ont apporté des connaissances sur le fonctionnement physique de cet estuaire mais la nature

du comblement terminal (notamment depuis quelques siècles) et une caractérisation fine des modalités de fonctionnement de ce type d'estuaire reste à établir.

Problématique de l'étude

L'inscription de cette thèse dans ce vaste projet se circonscrit notamment à un objectif méthodologique affirmé. Il n'est ici pas autant question d'apporter des réponses sur l'évolution spécifique, et complexe de l'Authie, que de mettre en évidence, par le biais d'une boîte à outils adaptée, les principaux mécanismes de sédimentation fine dans un contexte estuarien à co-dominance houle-marée et soumis à un comblement sableux avancé.

Sans être exhaustifs, nous avons voulu prendre en compte l'ensemble des compartiments de la dynamique sédimentaire estuarienne impliqués dans son évolution (Figure 0.4) en soulignant d'une part leurs interactions et d'autre part le rôle des sédiments fins dans ce contexte. Les principaux objectifs de cette thèse peuvent être résumés aux questions suivantes :

- Quelles sont les forçages qui contrôlent le transport des sédiments fins dans un milieu très énergétique ?
- Quels sont les mécanismes impliqués dans la sédimentation fine sur les zones intertidales ?
- Quelles sont les principales interactions au cœur de ces mécanismes ?
- Quelle est la place de la sédimentation fine dans l'histoire du comblement de l'estuaire ?

Cette caractérisation « globale » nécessite, il va de soi, une approche pluridisciplinaire. Tout en ce focalisant sur l'estuaire de l'Authie, ces travaux ont pour but d'apporter et d'évaluer des outils méthodologiques permettant une meilleure compréhension des mécanismes physiques de sédimentation fine à diverses échelles spatio-temporelles qui peuvent être applicables à d'autres sites.

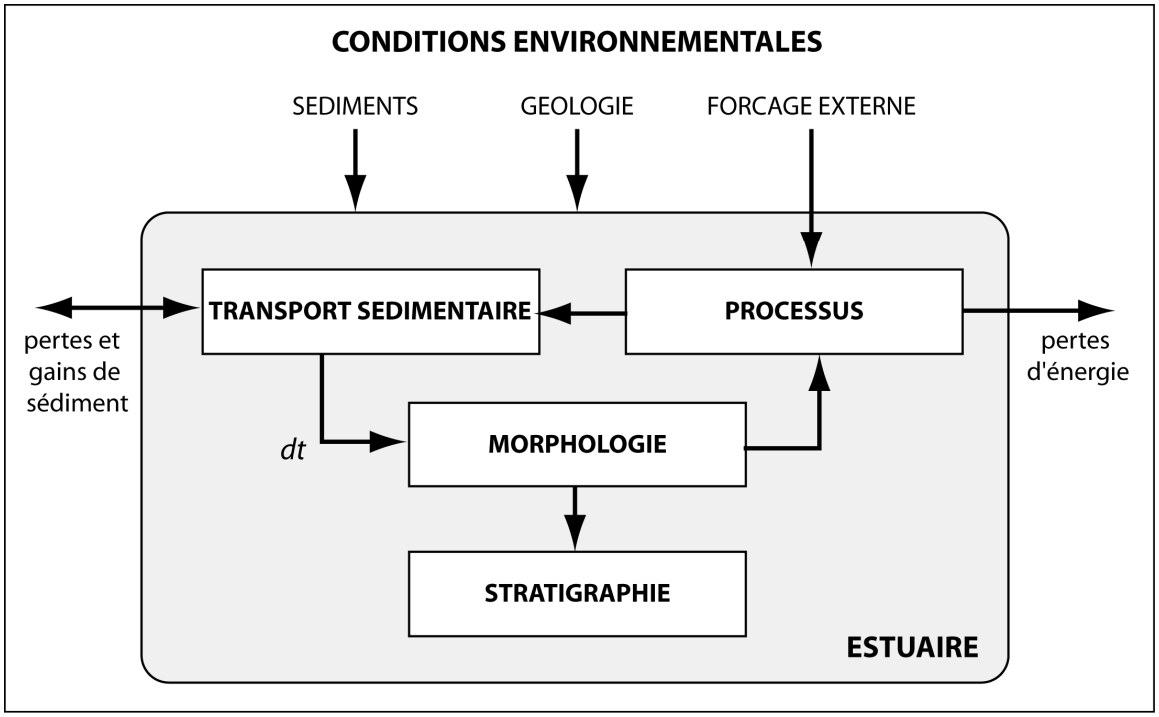


Figure 0.4. Principaux compartiments impliqués dans l'évolution des systèmes sédimentaires estuariens – adapté d'un schéma de morphodynamique des côtes de Masselink et Hughes (2003).

Figure 0.4. *Primary components involved in the evolution of estuarine sedimentary systems – adapted from a coastal morphodynamics framework by Masselink and Hughes (2003).*

Organisation de la thèse

Le Chapitre I est consacré à une présentation générale des estuaires à travers les différentes définitions et classifications proposées dans la littérature. Il propose également une synthèse sur les propriétés des sédiments fins et leur dynamique dans un environnement estuarien mégatidal. Le site d'étude y sera notamment plus amplement décrit et replacé dans son contexte régional.

Le Chapitre II décrit l'approche méthodologique qui a structuré ces travaux de thèse. Les échelles de temps et d'espace ainsi que le contexte pluridisciplinaire y seront abordés. Dans un souci de clarté, les techniques employées et les analyses effectuées seront subséquemment organisées par champs disciplinaires.

Cette thèse se décompose ensuite en quatre chapitres thématiques où sont développés les principaux résultats obtenus lors des acquisitions selon les échelles spatio-temporelles concernées.

Le Chapitre III propose tout d'abord une caractérisation morphodynamique de l'estuaire. Une première partie est consacrée à une description morpho-sédimentaire fine à laquelle succède une étude de l'hydrodynamique générale de l'Authie. L'inter-relation forte entre ces deux compartiments y sera notamment discutée.

Le Chapitre IV aborde les études hydro-sédimentaires spécifiques réalisées à l'échelle de la marée. Il porte sur la caractérisation du comportement hydrologique de l'estuaire, des matières en suspensions (MES) dans la colonne d'eau ainsi que des modalités de leur dépôt sur les aires intertidales.

Le chapitre V rassemble les résultats de suivi du flux et du dépôt de sédiments sur les espaces intertidaux sur une échelle de temps plus importante allant du cycle semi-lunaire à l'année. Le Chapitre VI élargit encore le cadre temporel à travers les études stratigraphiques, géotechniques et cartographiques qui permettent une investigation sur le siècle.

Le Chapitre VII propose enfin une synthèse des principaux résultats obtenus et une discussion sur la pertinence des outils employés.

INTRODUCTION

De manière générale, les classifications et les définitions ont pour objectifs respectifs de caractériser le milieu estuarien et d'ordonner les facteurs qui gouvernent sa dynamique. Elles fournissent un langage et une base solide pour décrire les similitudes et les différences entre les systèmes, que ce soit par rapport à leur structure ou à leur fonctionnement. Ce chapitre propose de suivre l'évolution des définitions et des classifications envisagées pour les estuaires dans la littérature scientifique dans un contexte pluridisciplinaire. Une discussion portera ensuite sur des thèmes spécifiques choisis en fonction de leur relation avec les définitions et les classifications présentées: gestion intégrée des estuaires, écologie et prédiction de leur évolution.

Au centre de ce travail, une description des sédiments fins et cohésifs sera ensuite présentée. Leurs sources possibles ainsi que leurs caractéristiques physico-chimiques seront abordées avant de décrire les modalités de leur transfert en milieu estuarien à travers les principaux mécanismes et processus de transport, sédimentation et érosion.

Enfin, une présentation de notre site d'étude, l'estuaire de l'Authie, permettra de situer ce système estuarien dans les schémas de classification existants tout en soulignant ses spécificités qui seront replacées dans le contexte côtier régional. Le choix de l'Authie comme site atelier sera également discuté en rapport aux enjeux actuels.

1. DEFINITIONS ET CLASSIFICATIONS DES ESTUAIRES

1.1. VERS UNE DEFINITION INTEGREE DES ESTUAIRES

1.1.1. PLURIDISCIPLINARITE DES DEFINITIONS

Les définitions proposées pour les estuaires sont nombreuses : Perillo (1995) en a recensé plus de quarante qui peuvent être regroupées selon différentes spécialités scientifiques (au moins une par discipline s'intéressant à cet environnement, le plus souvent de trois à dix). Elles reflètent notamment le parcours propre de chaque auteur et la localisation de l'estuaire sur lequel sa définition est fondée. Cependant elles montrent chronologiquement un certain effort d'intégration des différents champs de disciplines.

La première définition introduisant à la fois des considérations physiques et chimiques est sans doute celle de Ketchum (1951): «Un estuaire est une masse d'eau dans laquelle l'eau du fleuve se mélange à l'eau de mer et la dilue de façon mesurable».

Pritchard (1952) puis Cameron et Pritchard (1963) dépassent ce cadre en prenant en compte des aspects morphologiques: « Un estuaire est un corps d'eau côtier partiellement enfermé ayant une connexion libre avec la mer et dans lequel l'eau de mer est diluée de façon mesurable par l'eau douce provenant du drainage continental». Dionne (1963) poursuit dans cette voie et distingue trois zones dans un estuaire en relation avec les effets de la marée que l'on peut y observer (Figure 1.1) : «Un estuaire est un rentrant de la mer dans une vallée fluviale jusqu'à la limite amont de pénétration de la marée et qui peut être divisé en trois secteurs :

· **un estuaire supérieur** ou estuaire fluvial caractérisé par de l'eau douce mais assujetti à l'action quotidienne de la marée

· **un estuaire moyen** assujetti à un mélange d'eaux douce et salée

· **un bas estuaire** ou estuaire marin avec une connexion libre avec la mer».

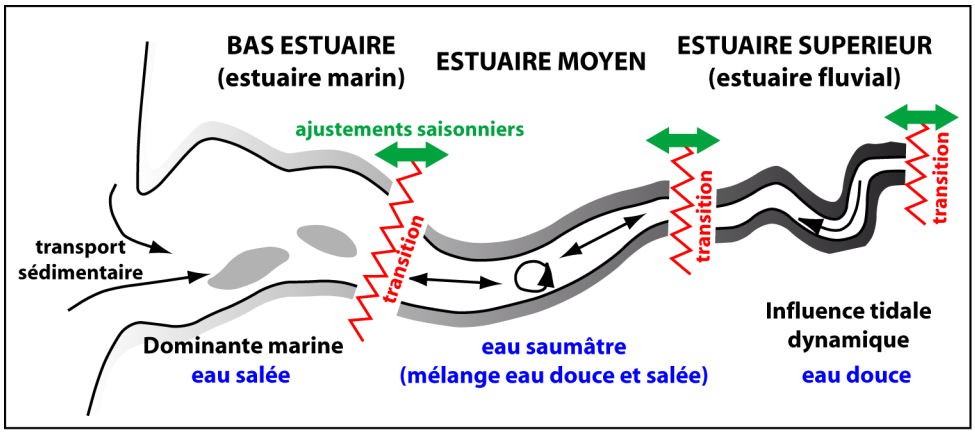


Figure 1.1. Différentes parties d'un estuaire, d'après Dionne (1963).

Figure 1.1. *Different parts of an estuary, from Dionne (1963).*

La définition de Dalrymple *et al.* (1992) inclut le point de vue de la sédimentologie et introduit une troisième composante du système estuarien, la houle : «Un estuaire est la partie marine d'un système de vallée ennoyée qui reçoit des sédiments à la fois d'origine fluviale et marine et qui contient des faciès de dépôts influencés par les processus liés à la marée, à la houle et au fleuve. L'estuaire s'étend entre la limite supérieure des faciès de marée à sa tête et la limite externe des faciès côtiers à son embouchure.»

1.1.2. DEFINITION GLOBALE OU UNIQUE ?

Il paraît difficile d'établir une définition globale prenant en compte toutes les caractéristiques du milieu estuarien même si les auteurs ont progressivement décrit les principaux facteurs à l'origine de sa dynamique. Perillo (1995) a récemment tenté une synthèse des différentes définitions existantes en y incluant notamment une considération biologique et en remplaçant l'ambiguë dilution « mesurable » de Cameron et Pritchard (1963) par une dilution « significative » : «Un estuaire est un corps d'eau côtier partiellement enfermé qui se prolonge jusqu'à la limite efficace de l'influence de marée, dans lequel l'eau de mer entrant par le biais d'une ou plusieurs connections libres avec la mer ou de n'importe quel autre corps d'eau salin et côtier est diluée de façon significative avec l'eau douce provenant du drainage continental, et qui peut soutenir des espèces biologiques euryhalines pendant une partie ou la totalité de leur cycle de vie».

Le développement d'une définition globale devrait normalement aboutir à une définition satisfaisante pour tous les scientifiques et donc unique d'une certaine façon car utilisée par tous. Or selon Dyer (1997), la définition la plus utilisée par la communauté scientifique reste celle de Cameron et Pritchard. Il l'adapte quant à lui comme suit : « Un estuaire est un corps d'eau côtier partiellement enfermé ayant au moins une connection libre vers la mer, s'étendant vers le fleuve jusqu'à la limite de l'influence des marées et dans lequel l'eau de mer est diluée de façon mesurable avec l'eau douce provenant du drainage continental». Le développement d'une classification considérant cette variabilité comme une caractéristique des estuaires devrait permettre d'établir une connexion plus étroite entre la structure de l'estuaire et les processus en action. Cette amélioration de la compréhension des liaisons existantes entre la structure et le fonctionnement des estuaires est le principal objectif des entreprises de classification.

1.2. CLASSIFICATIONS DES ESTUAIRES

Après avoir défini les estuaires en tant qu'objet d'étude, il est indispensable d'établir un schéma de classification c'est à dire de caractériser et d'ordonner les différents processus à l'origine de leur structure et intervenant donc dans leur fonctionnement. Les facteurs contribuant à la dynamique estuarienne sont nombreux et leurs interactions souvent complexes. Les entreprises de classification se sont donc préférentiellement développées selon trois grands axes : les processus hydrodynamiques en liaison avec la marée, la géomorphologie (la morphogénèse des estuaires et

l'influence réciproque de leur morphologie et du forçage physique au sens large) et les processus hydrologiques.

1.2.1. CLASSIFICATIONS HYDRODYNAMIQUES DES ESTUAIRES

1.2.1.1. Selon le marnage

En analysant la morphologie des dépôts de sable associés aux estuaires, Hayes (1975) a décrit leurs caractéristiques en fonction du marnage. Il a défini, selon la classification des côtes de Davies (1964), trois types d'estuaires :

· **Estuaire microtidal** (marnage inférieur à 2 mètres)

Ils sont dominés par l'action de la houle et des vagues mais si l'influence de la rivière est importante, ils peuvent rapidement évoluer en environnements deltaïques. Les principales formes de dépôts que l'on peut y observer sont les deltas de jusant, des formations liées à la houle (flèches, barres, plages…), dépôts de tempêtes et deltas de rivière.

· **Estuaire mésotidal** (marnage compris entre 2 et 4 mètres)

Ce type d'estuaire est le plus commun et le mieux étudié. Les courants de marée y dominent largement et les formations qui leur sont associées sont les deltas de marée (de flot et de jusant), les schorres et les vasières.

· **Estuaire macrotidal** (marnage compris entre 4 et 6 mètres)

Les courants de marée sont également dominants mais l'action de la houle peut être importante surtout à leurs embouchures.

Quand le marnage est supérieur est à 6 mètres, on peut parler également d'estuaire mégatidal. Le terme « mégatidal » a été premièrement évoqué en géomorphologie côtière dans une étude de plage à barres et à bâches (Levoy *et al.*, 2000) mais a été évoqué plus tôt dans la littérature dans le cadre de la dispersion des larves de bivalves en baie de Seine (Olivier *et al.*, 1996) ou dans celui du transport sédimentaire en baie du Mont Saint Michel (Erhold, 1999). Ce terme reste cependant peu employé dans le cas des estuaires en raison de la diminution du marnage à l'intérieur de ces systèmes. Son emploi est cependant justifié dans quelques cas car ce qualificatif dépend de l'amplitude moyenne des marées de vives-eaux à l'embouchure.

1.2.1.2. Selon l'importance relative du frottement et de la convergence

Dans les contextes de fort marnage, le prisme tidal est important. Il correspond au volume entrant et sortant à chaque marée et représente en quelque sorte la "capacité d'accueil" en eau de l'estuaire (volume oscillant). L'interaction entre la propagation de l'onde de marée et la morphologie de l'estuaire amène de grandes variations dans l'amplitude de la marée et l'intensité des courants induits (Dyer, 1997). Nichols et Biggs (1985) définissent trois types d'estuaires en fonction de l'importance relative de la convergence et des phénomènes de friction (Figure 1.2) :

· **Estuaires hypersynchrones**

La convergence y domine la friction. Ils sont souvent en forme d'entonnoir : l'amplitude de la marée et les courants de marée augmentent progressivement avant de diminuer au niveau de la tête des estuaires où la friction finit par atténuer les effets dus à la convergence.

· **Estuaires synchrones**

Les deux influences sont d'égale importance : l'amplitude de la marée est constante jusqu'à la section fluviale.

· **Estuaires hyposynchrones**

La friction est ici supérieure à la convergence. Les plus grandes vitesses de courants sont observées à l'embouchure, généralement réduite, et l'amplitude de la marée décroît vers la partie amont du fleuve.

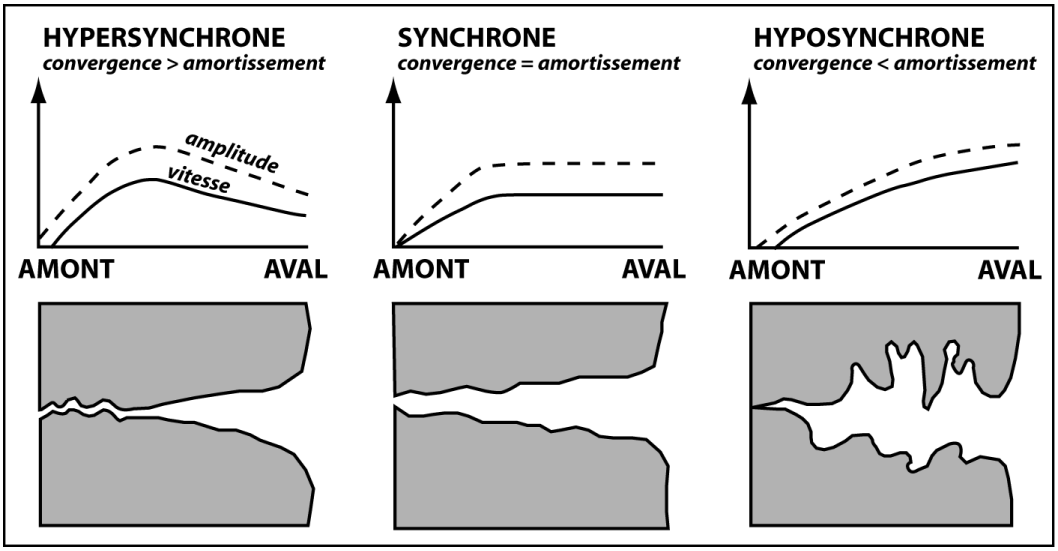


Figure 1.2. Types d'estuaires associés à leur morphologie, d'après Nichols et Biggs (1985).

Figure 1.2. *Estuary types and their morphology, from Nichols and Biggs (1985).*

1.2.1.3. Selon l'asymétrie des marées

Friedrichs et Aubrey (1988) classent les estuaires en deux catégories selon le comportement de la marée en fonction de la morphologie. Ils utilisent deux paramètres pour séparer les estuaires dominés par le jusant de ceux dominés par le flot (Figure 1.3). D'une part, le rapport entre le prisme intertidal et le volume des chenaux et, d'autre part, le rapport de l'amplitude de la marée à l'embouchure sur la profondeur moyenne de l'estuaire qui semble être le paramètre le plus discriminant et qui peut être relié au nombre barotropique de Froude que nous considérerons plus précisément par la suite. Les estuaires dominés par le flot sont le plus souvent hypersynchrones en régime macrotidal. Le flot y est intense car la marée est peu freinée par la morphologie de l'estuaire. Inversement, les estuaires dominés par le jusant sont généralement hyposynchrones dans un contexte microtidal.

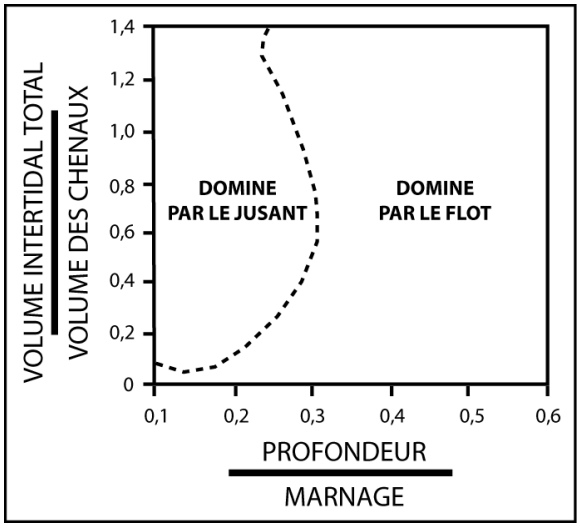


Figure 1.3. Diagramme situant les estuaires selon leur morphologie (Dyer, 1995 d'après Friedrichs et Aubrey, 1988).

Figure 1.3. *Diagram of estuarine tidal type as a function of morphology (Dyer, 1995 from Friedrichs et Aubrey, 1988).*

1.2.2. CLASSIFICATIONS GEOMORPHOLOGIQUES DES ESTUAIRES

1.2.2.1. Selon la topographie

La première classification géomorphologique des estuaires a été faite par Pritchard (1952). Malgré sa dénomination, cette typologie prend surtout en compte les caractéristiques de genèse,

c'est à dire de mise en place des estuaires. Pritchard distingue trois catégories auxquelles il ajoute une quatrième un peu plus tard (Pritchard, 1960):

· **Vallée fluviale ennoyée** (exemple : Gironde et baie de Chesapeake)

Elles résultent de l'invasion marine due à la transgression holocène dans des vallées fluviales formées aux basses et moyennes latitudes durant le Pléistocène. Ces vallées présentent des variations morphologiques qui dépendent de leur lieu de formation : leur section est en forme de V plutôt aigu quand les vallées se sont établies sur des côtes rocheuses, et plus ouvert sur les plaines côtières où elles sont composées de terrasses sur un ou deux cotés. Les vallées fluviales ennoyées correspondent à l'idée commune et populaire d'un estuaire en raison de leur répartition actuellement dominante. Leur profondeur oscille généralement autour de dix mètres et leur section augmente de façon progressive jusqu'à leurs embouchures en forme d'entonnoir (où leur profondeur peut parfois atteindre une vingtaine de mètres).

· **Fjord** (nombreux exemples sur les côtes canadiennes et scandinaves)

Situés aux hautes latitudes, ils résultent de l'ennoiement marin de vallées fluviales érodées par la progression des glaciers formés lors de la dernière glaciation. Ainsi modelées, ces vallées profondes possèdent une section en forme de U. Elles présentent une barre transversale de plus faible profondeur au niveau de leur embouchure qui correspond aux dépôts (moraines) les plus avancés vers la mer. La profondeur de cette dernière varie de 4 à 150 mètres pour des vallées dont les profondeurs sont comprises entre 200 et 800 mètres.

· **Estuaire d'arrière barrière** (exemple : Mono, Bénin)

Ces estuaires, appelés également lagunes côtières, se sont majoritairement formés dans des vallées fluviales de bas relief en contexte de marnage et de débit fluvial faibles. On peut les retrouver en conditions méso- et macrotidales (estuaire du bassin d'Arcachon) quand les processus côtiers sont dominants et induisent la formation d'un cordon littoral qui les entrave. Cette barrière sableuse, résultant de la dérive littorale et du transport sédimentaire associé, peut présenter un nombre variable de connections directes (appelées passes tidales) avec la mer qui dépend de sa largeur et de sa longueur. Ce sont des estuaires très peu profonds (environ 2 mètres) hormis près des passes tidales et dans les chenaux, et bordés soit par leur environnement d'origine (côte microtidale), soit par des marais maritimes (climat tempéré) ou des mangroves (climat tropical).

· **Estuaire tectonique**

Cette catégorie regroupait au départ les estuaires ne correspondant pas aux trois autres types dont la baie de San Francisco et ses affluents formés par des processus tectoniques (faille de San Andréas).

Cette typologie est trop inclusive car elle prête les mêmes particularités aux estuaires formés par les même processus indépendamment de leur localisation géographique (Perillo, 1995).

1.2.2.2. Classification dynamique ou évolutive

Dalrymple *et al.* (1992) considèrent le développement morphologique comme une séquence évolutive déterminée par le changement de l'intensité relative de l'influence du fleuve, de la houle et de la marée (Figure 1.4).

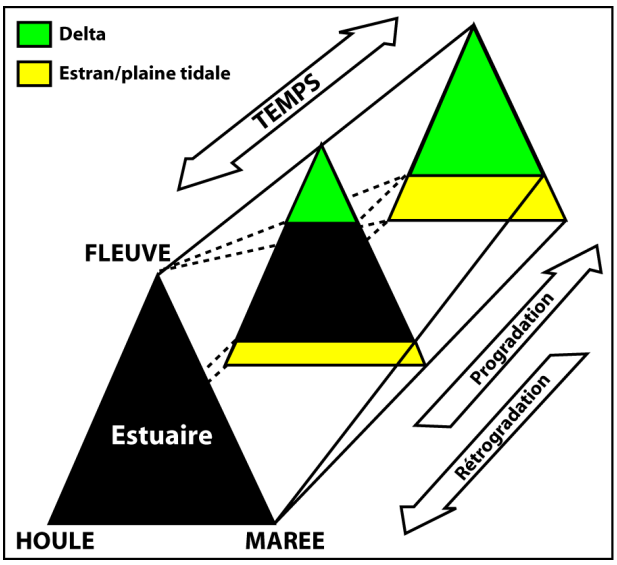


Figure 1.4. Classification évolutive de Dalrymple *et al.* (1992).
Figure 1.4. *Evolutive classification of Dalrymple et al. (1992).*

Les estuaires sont au centre de ce diagramme conceptuel (les phénomènes étant difficilement quantifiables) qui peut être étendu en introduisant la notion de temps comme une fonction de l'évolution morphologique selon une situation de progradation ou de rétrogradation (Dyer, 1997). Si la progradation est liée à l'augmentation de la quantité de sédiments venant du fleuve, les deltas se développent aux dépens des estuaires. Si elle est due à une baisse du niveau de la mer, les vasières et les plaines alluviales se développent. Les phases de transgression marines voient le nombre et l'extension des estuaires augmenter. Si le niveau de la mer reste constant pendant une longue période, les estuaires peuvent atteindre une forme d'équilibre.

L'interaction entre les influences du fleuve, de la houle et de la marée a été considérée plus profondément en relation avec les faciès sédimentaires par Dalrymple *et al.* (1992). Ils distinguent deux types d'estuaires :

· **Estuaire dominé par la marée** (Figure 1.5B)

Formés dans un contexte macrotidal, ces estuaires se révèlent habituellement hypersynchrones. Ils sont composés de bancs sableux médians à leur embouchure. Ces estuaires sont bordés de marais maritimes.

· **Estuaires dominés par la houle** (Figure 1.5B)

Ils se forment généralement dans des conditions micro- à mésotidales. Ils sont assimilés à des estuaires hyposynchrones car les courants de marée diminuent vers la tête de l'estuaire. La houle est responsable des formations sableuses à son embouchure qui protègent efficacement un large bassin central. Cette atténuation locale de l'hydrodynamisme permet le développement d'un ''delta'' à la tête de l'estuaire formé de sédiments alluviaux et d'un delta de flot via la formation d'une passe tidale à travers le cordon sableux.

Woodroffe (1996) a ensuite effectué une synthèse de cette classification en y intégrant les estuaires dominés par le fleuve.

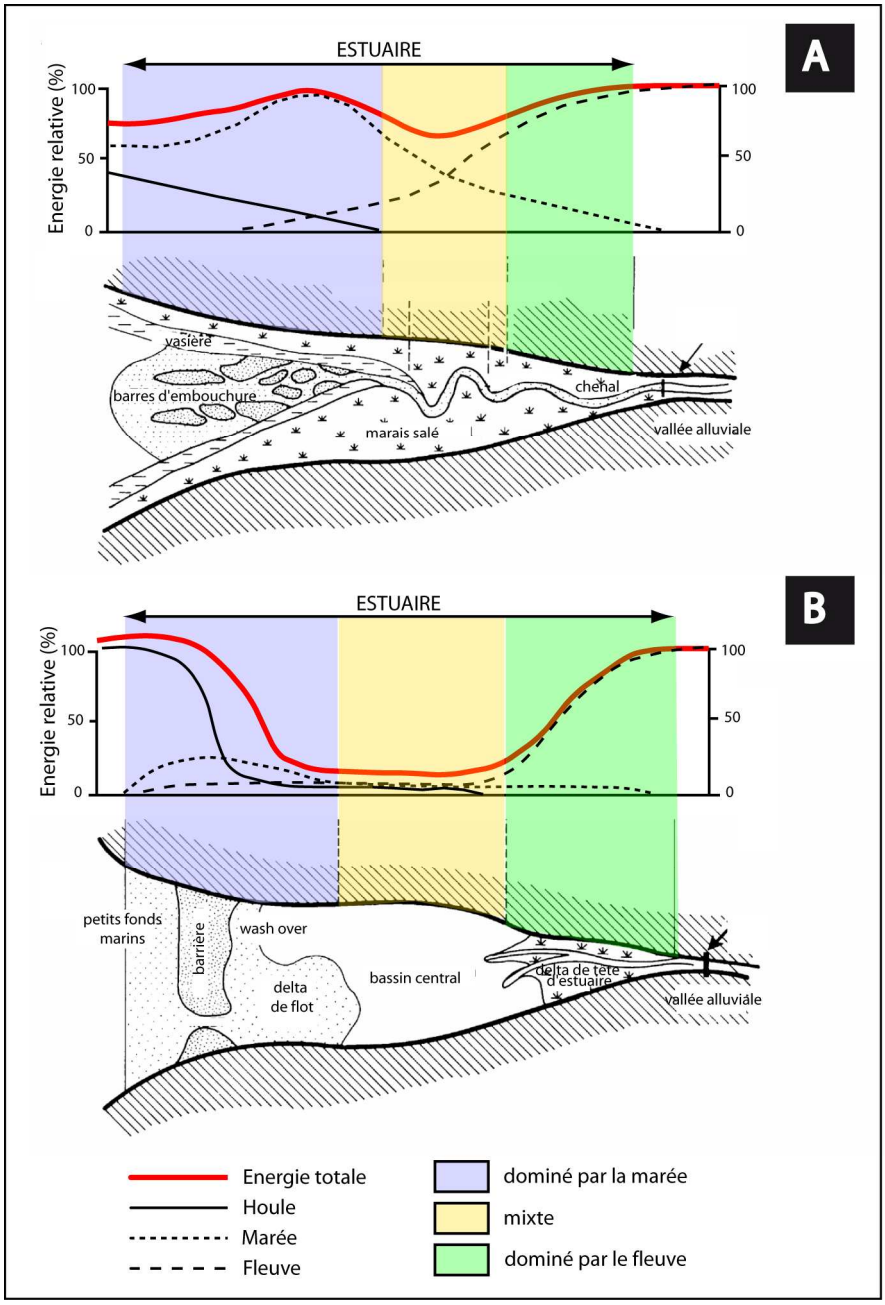


Figure 1.5. Typologie des estuaires et distribution des processus dynamiques, d'après Dalrymple *et al.* (1992).

Figure 1.5. *Typology of estuaries and dynamical processes distribution, from Dalrymple et al. (1992).*

1.2.2.3. Selon la morphologie

Fairbridge (1980) a basé sa classification sur des paramètres morphologiques et hydrodynamiques à savoir selon le relief et le degré de restriction de la circulation à l'embouchure. Cette typologie développe les catégories plus grossières de la classification de Pritchard (1960). Les nouveaux sous types introduits sont les suivants :

· **Fjard** : estuaire formé dans les mêmes conditions qu'un fjord, le relief étant moins important.

· **Ria ou aber** : estuaire de relief assez important dont la section est en forme de V.

· **Estuaire de plaine côtière** : estuaire de bas relief avec une embouchure en forme d'entonnoir présentant des barres sableuses longitudinales.

· **Estuaire aveugle** : estuaire de bas relief entravé de façon permanente ou périodique par des formations dues au transport sédimentaire induit par la dérive littorale et/ou par des dunes avec ou sans barres éoliennes.

· **Estuaire de type deltaïque** : comblement de l'estuaire et de son embouchure jusqu'à une progradation de dépôts deltaïques restant fortement assujettis à la marée.

· **Estuaire de type tectonique ou composé** : leur forme est due à des processus néotectoniques tels que le volcanisme, la formation de failles, les phénomènes d'isostasie.

Fairbridge (1980) sépare les estuaires en déséquilibre, résultant de la récente montée du niveau de la mer (transgression flandrienne) et souvent affectés par des processus tectoniques, et les estuaires en équilibre dont la forme résulte plutôt d'une construction sédimentaire postérieure.

1.2.2.4. Classification morphogénétique

Perillo (1995) combine les deux classifications précédentes et établit une classification dont la hiérarchisation prend successivement en compte : la chronologie de la formation des estuaires par rapport à la transgression flandrienne (estuaires primaires et secondaires), les processus à l'origine de leur forme actuelle (ancienne vallée fluviale, ancienne vallée glaciale, estuaires dominés par la rivière, estuaires structuraux) puis le relief de leur situation (ria/estuaire de plaine côtière, fjord/fjard) ou l'importance des processus côtiers à travers la formation ou non d'un delta (fleuve tidal, estuaire de front de delta).

Selon les critères utilisés par Shepard (1963) pour sa classification des côtes, il distingue les estuaires primaires dont la forme actuelle est peu différente de leur forme d'origine (résultant de processus terrestres et tectoniques) des estuaires secondaires qui doivent leur forme aux processus agissant depuis que la mer a atteint son niveau actuel. Ces derniers regroupent exclusivement les lagunes côtières, corps d'eau plus ou moins fermés sans entrée significative d'eau douce, qui sont classées en fonction de leur degré de connexion avec la mer.

1.2.3. CLASSIFICATIONS HYDROLOGIQUES DES ESTUAIRES

1.2.3.1. Bases conceptuelles

La majorité des estuaires étudiés sont de type plaine côtière ; cependant de grandes différences sont constatées dans les modèles de circulation et les processus de mélange et de stratification par densité (Dyer, 1997). Cette classification utilise la distribution de la salinité et les caractéristiques d'écoulement dans les estuaires. Cameron et Pritchard (1963) ont défini trois types d'estuaires en partant d'un simple postulat (Figure 1.6A) : la différence de densité entre l'eau douce et l'eau salée crée une interface (ou halocline) marquée et horizontale séparant une masse d'eau en surface (eau douce) et une autre masse en profondeur (eau salée).

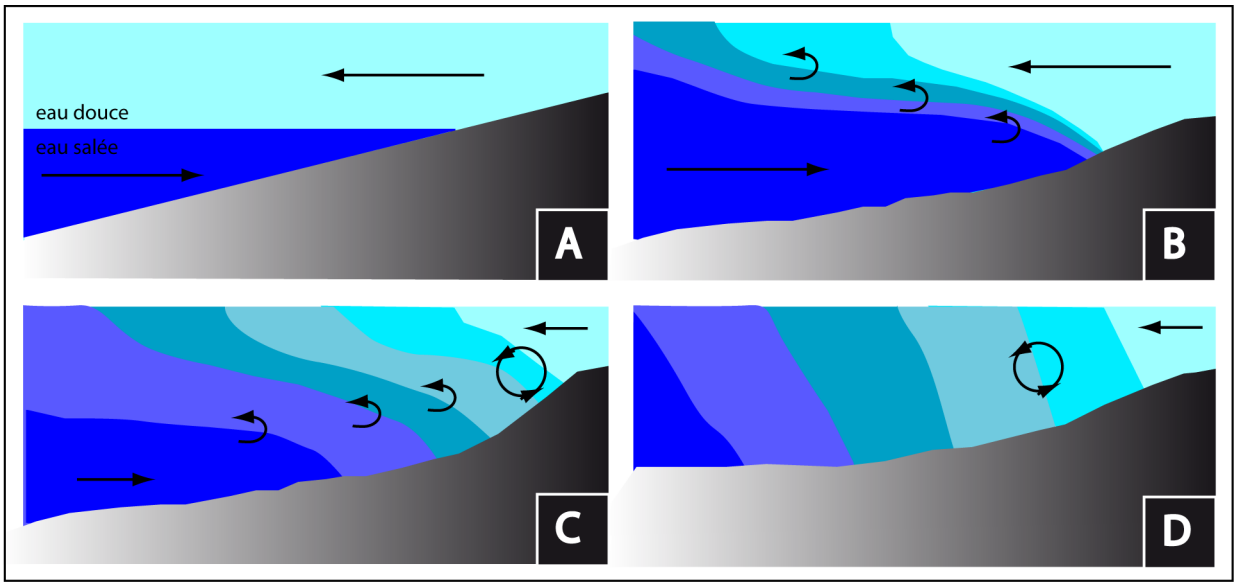


Figure 1.6. Schématisation de la classification de Cameron et Pritchard (1963), d'après Dyer (1997). **A.** Postulat de base ; **B.** Estuaire fortement stratifié ; **C.** Estuaire partiellement mélangé ; **D.** Estuaire bien mélangé.

Figure 1.6. *Simplification of the Cameron and Pritchard (1963) classification, from Dyer (1997).* ***A.*** *Basic premise;* ***B.*** *Highly stratified estuary;* ***C.*** *Partially mixed estuary;* ***D.*** *Well mixed estuary.*

· **Estuaire fortement stratifié** : type fjord / type coin salé (Figure 1.6B)

Ils sont caractérisés par un écoulement d'eau douce dominant (en raison du débit fluvial et/ou des conditions climatiques à travers la pluviométrie), le régime étant le plus souvent microtidal. Si la vitesse à la surface est suffisamment élevée, le cisaillement crée une micro-turbulence à l'interface induisant un léger mélange : de l'eau salée est injectée en surface (ce phénomène est

appelé entraînement). Ce mélange n'est pas réciproque et, pour préserver une continuité, un léger mouvement d'eau venant de la mer compense cette perte en profondeur.

· **Estuaire partiellement mélangé** (Figure 1.6C)

Dans un contexte de plus fort marnage (mésotidal), la friction sur le fond crée une turbulence qui mélange la colonne d'eau plus efficacement que par entraînement. La halocline est réduite et on observe un gradient longitudinal de salinité. On parle de circulation verticale de gravité : l'écoulement résiduel dirigé vers la mer emporte avec lui le sel du mélange vertical et le flux de compensation est assez important. Le point nodal matérialise l'endroit où les vitesses résiduelles s'annulent.

· **Estuaire bien mélangé ou verticalement homogène** (Figure 1.6D)

Dans les estuaires macrotidaux, le mélange engendré par une turbulence maximale est complet et crée une certaine homogénéité verticale. Cependant on observe des variations latérales de vitesse et de salinité : une circulation horizontale se développe aux dépens d'une circulation verticale. On peut définir deux sous types :

- Estuaire latéralement non homogène

Ce sont des estuaires larges où les forces de Coriolis (dans l'hémisphère Nord) et centrifuge séparent les courants de flot de ceux du jusant (respectivement vers la rive gauche et vers la rive droite de l'estuaire) à travers la spécialisation des chenaux.

- Estuaire latéralement homogène (ou **homogène sur la section**) :

Dans un estuaire de petite taille, le cisaillement latéral est suffisamment important pour créer des conditions homogènes.

1.2.3.2. Paramétrisation

Cette classification utilise le sel comme traceur mais une paramétrisation plus générale peut se fonder sur l'évaluation de l'énergie de turbulence (Bokuniewicz, 1995). En effet, cette typologie s'inscrit dans une séquence dynamique reflétant l'importance relative entre les courants de marées qui induisent un mélange par frottement et l'écoulement du fleuve qui maintient une stratification.

Une approche quantitative permet de situer plus précisément un estuaire dans cette classification en caractérisant le rapport entre ces deux facteurs. Elle doit également prendre en compte la circulation par gravité qui les influence ainsi que les variations de l'amplitude de la marée (selon la profondeur et la taille de la section) et la circulation par advection.

- Paramétrisation à une dimension

Simmons (1955) établit une première paramétrisation à une dimension et définit le rapport d'écoulement (P) ou indice de mélange (Schultz et Simmons, 1957 ; Schubel, 1971) comme le rapport de la quantité d'eau douce fournie en un cycle de marée sur le volume du prisme tidal.

Il peut être assimilé à la relation suivante : $P = u_f / u_t$

avec u_f : vitesse d'écoulement du fleuve, $u_f = R/A$ (R : débit du fleuve, A : aire de la section),

u_t : vitesse moyenne des courants de marée

Ensuite, Ippen et Harleman (1961) introduisent un nombre de stratification St qui représente le ratio du taux de dissipation d'énergie (G) sur le taux de gain d'énergie potentielle (J) sur une longueur définie du fleuve vers la mer. Selon Prandle (1985) :

$$S_t = G/J = \frac{0{,}85\ k\ U_0\ L}{(\Delta\rho/\rho) g h^2 u_f}$$

avec k : coefficient de friction (0,0025) ; U_o : amplitude des courants de marée,

L : longueur de l'estuaire ; g : gravité ; h : profondeur

Le nombre de stratification est dépendant de la longueur et de la profondeur de l'estuaire pour des conditions similaires d'écoulement fluvial et de marée. L'ambiguïté liée à l'utilisation d'un seul paramètre suggère l'idée qu'au moins deux paramètres sont requis pour décrire l'interaction entre les courants de marée et l'écoulement fluvial.

- Paramétrisation à deux dimensions

Hansen et Rattray (1966) ont formulé le premier schéma de classification à deux paramètres sans dimension utilisant leur théorie de circulation par gravité. Les paramètres utilisés sont :

· le paramètre de stratification $\Delta S/S$: différence de salinité entre la surface et le fond sur la salinité verticale moyenne. Il peut être relié au nombre de stratification selon Prandle (1985) qui établit, en comparant des données, la relation suivante : $\Delta S/S = 4\ S_t\ e^{-0.55}$

· le paramètre de circulation u_s/u_f : rapport de la vitesse de surface (u_s) sur la vitesse d'écoulement du fleuve (u_f).

Le diagramme regroupant ces deux paramètres (Figure 1.7) permet de distinguer les types d'estuaire suivants :

· Type 1 : estuaires dont l'écoulement net s'effectue vers la mer à toutes les profondeurs et dont le transport ascendant de sel est réalisé par diffusion (1a: estuaire bien mélangé latéralement homogène, 1b: estuaire nettement stratifié sans écoulement inférieur résiduel).

· Type 2 : estuaire partiellement mélangé (advection et diffusion).

· Type 3 : transfert de sel par advection (3b: fjord)

· Type 4 : stratification intense (coin salé)

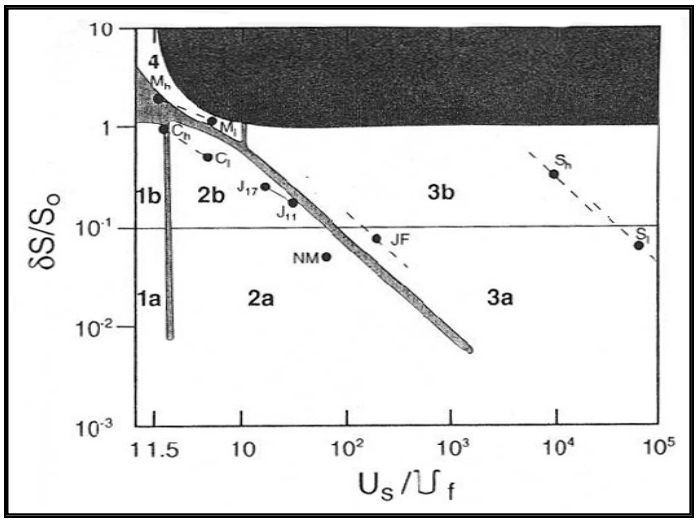


Figure 1.7. Diagramme de circulation - stratification (Jay *et al.*, 2000).

Figure 1.7. *Circulation - stratification diagram (Jay et al., 2000).*

Un estuaire peut cependant avoir différentes positions sur le diagramme selon les variations du débit du fleuve et selon la situation de la section considérée (amont-aval). Les auteurs ont utilisé deux autres paramètres afin de le localiser plus précisément :

· le rapport d'écoulement P

· le nombre densimétrique de Froude F_m $\quad F_m = \dfrac{u_f}{(gh((\rho/\rho))^{1/2}}$

Dans le but de mieux relier les phénomènes physiques au forçage hydrodynamique, Jay et Smith (1988) suggèrent une autre paramétrisation utilisant :

· le nombre barotropique (ou externe) de Froude F_T : amplitude moyenne de la marée dans l'estuaire sur la profondeur moyenne. $F_T = \zeta_M / h$

· le nombre baroclinique (ou interne) de Froude FB : $F_B = d/D\ (\Delta\rho_h/\Delta\rho_v)^{-1.2}$

avec $\Delta\rho_h$: différence de salinité horizontale ; $\Delta\rho_v$: différence de salinité verticale à mi-estuaire ; d/D : rapport des épaisseurs des deux couches.

Le nombre interne de Froude estime la force de la circulation résiduelle : les estuaires situés à la droite du diagramme (Figure 1.8) sont l'objet d'un fort mélange par advection.

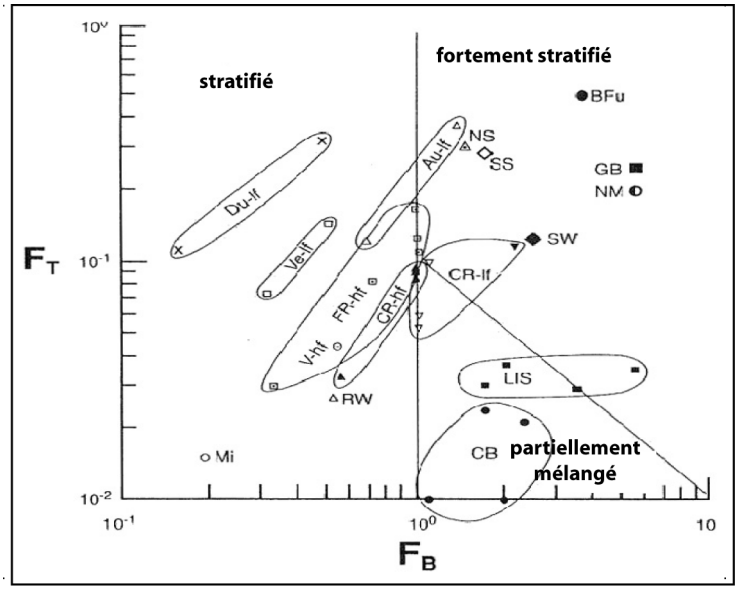


Figure 1.8. Diagramme des niveaux de stratification, d'après Jay et Smith (1988).

Figure 1.8. *Diagram of stratification levels, from Jay and Smith (1988).*

Un grand nombre de formulations peut être utilisé pour calculer les paramètres présentés à partir de mesures directes. Ainsi, un nombre d'estuaire Ne peut être définit comme suit (Uncles *et al*., 1983) :

$N_e = (\mathbf{P}F_m^2)/TR$ avec P : volume du prisme tidal, T : période de marée.

Fischer (1972) introduit le nombre de Richardson adapté aux estuaires (Rie) qui représente le rapport entre le gain d'énergie potentiel dû au débit fluvial sur le pouvoir de mélange des courants de marée. $Ri_e = (\Delta\rho/\rho).(gu_f / hu_t^3)$

Il est relié aux paramètres de Hansen et Rattray selon la relation suivante : $Ri_e = P^3 / F_m^2$

Selon Dyer (1997), le nombre densimétrique de Froude semble être le paramètre qui représente le mieux la circulation car il n'a pas de dépendance avec le degré de mélange vertical et horizontal. La stratification, en revanche, est bien expliquée par le nombre estuarien de Richardson qui dépend des deux. Un récapitulatif des valeurs obtenues par type d'estuaire selon les différents paramètres est présenté dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1. Valeurs des paramètres selon les auteurs et le type d'estuaire.

Table 1.1. *Values of parameters according to authors and estuary type.*

PARAMETRES	AUTEURS	TYPES D'ESTUAIRE		
		Bien mélangé	Partiellement mélangé	Stratifié
Rapport d'écoulement P	Schultz et Simmons,1957 Schubel, 1971	< à 0,1	environ 0.25	> à 1
Nombre de stratification S_t	Ippen et Harleman, 1963 Prandle, 1985	> à 200 > à 400	entre 100 et 400	< à 20 < à 100
Paramètre de stratification $\Delta S/S$	Prandle, 1985	< à 0,15		> à 0,32
Nombre interne de Froude F_B Nombre externe de Froude F_T	Jay et Smith, 1988 Jay et Smith, 1988	> à 1 < à F_B^{-1}	> à 1 > à F_B^{-1}	< à 1
Nombre d'estuaire Ne	Uncles *et al*, 1983	> à 0,1		< à 0,1
Nombre de Richardson Ri_e	Fischer, 1972	< à 0,08	entre 0,08 et 0,8	> à 0,8

1.3. DISCUSSION SUR LES DEFINITIONS ET LES CLASSIFICATIONS

Grâce à l'amélioration des communications interdisciplinaires, des perspectives nouvelles en terme de classification des estuaires émergent, notamment par l'intermédiaire du développement de la connaissance des environnements littoraux qui leur sont plus ou moins directement associés. Un diagramme comparable à celui de Dalrymple *et al.* (1992) pour les estuaires avait déjà été utilisé pour décrire les trois influences qu'il regroupe sur les deltas (Galloway, 1975 ; Wright et Coleman, 1973) et sur les lagunes (Nichols et Allen, 1981). Certains auteurs s'intéressent maintenant à décrire plus précisément certaines parties fonctionnelles du système estuarien où de nouvelles classifications sont entreprises. Une typologie des vasières intertidales a notamment été récemment engagée par Dyer *et al.* (2000).

La variété des estuaires que l'on peut rencontrer à travers le monde exprime la diversité des processus intervenant dans ce type de système : il paraît difficile de tous les intégrer dans un même schéma de classification. C'est pourquoi il existe des classifications différentes avec des critères et des objectifs propres. Un schéma de synthèse est proposé : il regroupe les classifications abordées et présente les relations existantes entre les différentes classes d'estuaire (Figure 1.9).

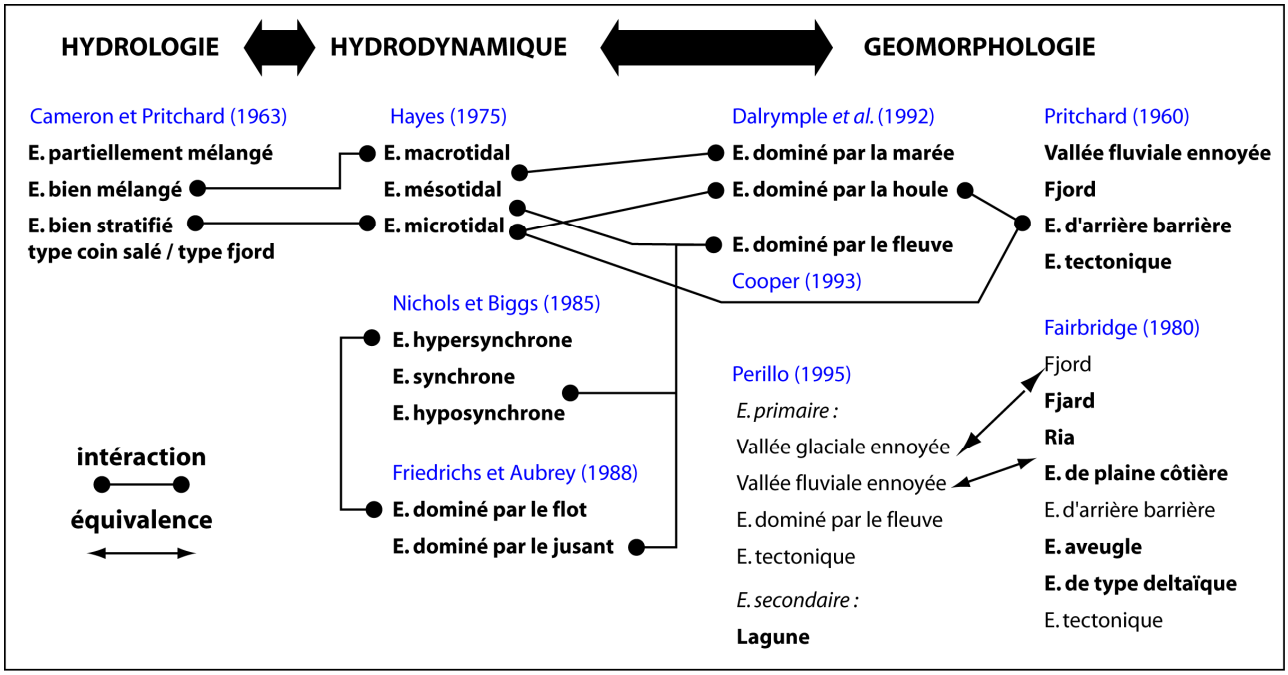


Figure 1.9. Classifications proposées pour les estuaires : descriptions, innovations (en gras) et correspondances (interaction et équivalence).

Figure 1.9. *Proposed classifications for estuaries: descriptions, innovations (in bold) and correspondences (interaction and equivalence).*

1.3.1. DE LA NECESSITE D'UNE DEFINITION INTEGREE

Comme le souligne Perillo (1995), le manque d'une définition globale des estuaires n'a pas empêché les chercheurs d'étudier les estuaires et de progresser dans leur connaissance. Cependant, la complexité des processus estuariens et de leur interaction rend les études pluridisciplinaires souvent indispensables à une compréhension plus large du fonctionnement des estuaires. Cette collaboration entre scientifiques est à l'origine du besoin d'une définition globale. Ce travail est donc mené de pair avec les entreprises de classification. La multitude de définitions pose un réel problème pratique dans le cadre de la gestion des estuaires. A titre d'exemple, le même champ d'investigation n'est pas pris en compte selon la définition utilisée (Figure 1.10).

L'établissement d'une communication claire entre les différents acteurs semble reposer sur une définition non ambiguë et exclusive. Une définition unique et globale devient une nécessité pratique urgente, notamment à des fins législatives, dans le cadre de la mise en place de plans de gestion intégrée.

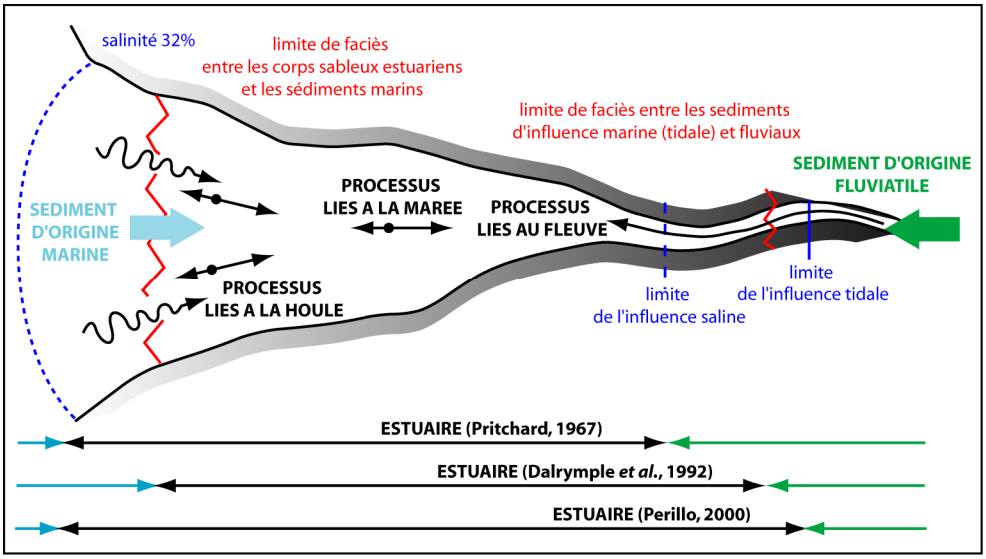


Figure 1.10. Délimitation d'un estuaire selon différents auteurs (d'après Perillo, 2000).

Figure 1.10. *Demarcation of an estuary according to different authors (from Perillo, 2000).*

1.3.2. VERS UNE CLASSIFICATION ECOLOGIQUE DES ESTUAIRES

Jay *et al.* (2000) ont voulu unifier deux types de classifications considérant des paramètres physiques (classifications hydrodynamiques non dimensionnelles et géomorphologie) pour y inclure les processus en liaison avec les écosystèmes. Ils établissent une classification géomorphologique avec une structure hiérarchique en reprenant le schéma de classification de Montgomery et Buffington (1993) qui différencie les environnements fluviaux selon l'approvisionnement en sédiment et leur transport par l'écoulement fluvial. Ils l'étendent aux estuaires en identifiant les six processus de transport sédimentaire propres aux systèmes estuariens :

· $\mathbf{Q_R}$: écoulement du fleuve (nombre densimétrique de Froude **Fm**)

· $\mathbf{Q_T}$: écoulement oscillant de la marée (nombre externe de Froude $\mathbf{F_T}$)

· $\mathbf{Q_I}$: circulation interne ou force de poussée d'Archimède : processus associés à la présence d'eau de différentes densités (circulation de gravité…) (nombre interne de Froude $\mathbf{F_B}$; nombre de Richardson $\mathbf{Ri_e}$)

· $\mathbf{Q_A}$: circulation due au forçage atmosphérique (influence de l'action du vent à la surface de l'eau et changement du niveau de la mer associée à l'action du vent à distance sur l'océan)

· $\mathbf{Q_W}$: transport et remise en suspension par la houle

· $\mathbf{Q_H}$: transport par les glaciers

Cette typologie intègre les processus mis en évidence par la classification hydrologique comme étant responsables d'une partie des modalités de transport sédimentaire. L'occurrence et les

variations spatiales que présentent tous ces types de transport permettent d'identifier différents environnements selon leur combinaison et leur dominance. L'échelle de temps à laquelle chaque facteur provoque un forçage mesurable (de la seconde à la saison) est plus amplement considérée. De plus, ces vecteurs du transport des sédiments peuvent être reliés à des paramètres hydrodynamiques sans dimension (quelques exemples sont mentionnés entre parenthèses) et peuvent donc être quantifiés.

Malgré tout, les classifications proposées actuellement utilisent des paramètres physiques dont la pertinence est moindre pour la compréhension de l'écologie estuarienne. Une classification des écosystèmes estuariens devrait se focaliser sur les processus physiques qui sont plus étroitement couplés aux processus biogéochimiques et écologiques, tels que le temps de résidence des masses d'eau chargées en éléments particulaires et dissous (organismes, nutriments, sédiments…) et les échanges entre différents environnements estuariens (Geyer *et al.*, 2000 ; Jay *et al.*, 2000).

1.3.3. PERSPECTIVES DE PREDICTION

Les classifications ne doivent pas seulement être rétrospectives mais également prédictives (Jay *et al.*, 2000). Pour cela, elles doivent évoluer vers une intégration de la complexité et de la variabilité des processus à différentes échelles. Les modèles de simulation, issus du développement paramétrique des classifications, permettent une investigation théorique plus poussée en soutenant des comparaisons quantitatives avec les observations, lesquelles rendent compte en retour de leur qualité. Ils souffrent d'une trop grande généralisation et leur utilisation spécifique devrait donc aboutir à une meilleure compréhension des processus estuariens et de leurs interactions (Geyer *et al.*, 2000). Les aménagements visant à améliorer la navigation (chenalisation) et à conquérir de nouvelles terres sur la mer (poldérisation) ont provoqué de profonds changements dans la géométrie et l'hydrologie des estuaires (Paskoff, 1998). La plupart des estuaires étant dynamiquement couplés aux régimes d'estuaire voisins, le développement de comparaisons inter-site à l'échelle régionale peut permettre une meilleure compréhension de la réponse des estuaires à ces perturbations et donc d'établir des plans de gestion plus adéquats. De plus, les habitats estuariens risquent de subir des altérations importantes en raison du changement climatique global qui s'est amorcé (hausse du niveau de la mer…). On doit cependant être prudent pour distinguer les tendances induites par l'anthropisation et les variations normales de longue période (Geyer *et al.*, 2000). L'acquisition de longues séries de données est donc également essentielle pour décrire et prévoir cette variabilité temporelle à différentes échelles (suivi long terme). Un des enjeux de la

recherche estuarienne en terme de prédiction pour les années à venir sera d'estimer de façon quantitative et prédictive la réponse des estuaires aux variations, à différentes échelles de temps et d'espace, des paramètres responsables de sa dynamique.

2. LES SEDIMENTS FINS EN DOMAINE ESTUARIEN

2.1. ORIGINES ET CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS FINS

Le terme sédiments fins sous entend en premier lieu une caractéristique principale déterminée par la granulométrie. Ils sont composés d'éléments de taille inférieure à 63µm, des argiles (< 4µm) et des silts (entre 4 et 63µm).

Les sédiments fins qui transitent et se déposent dans un système estuarien peuvent provenir d'une large gamme de sources possibles (Figure 1.11).

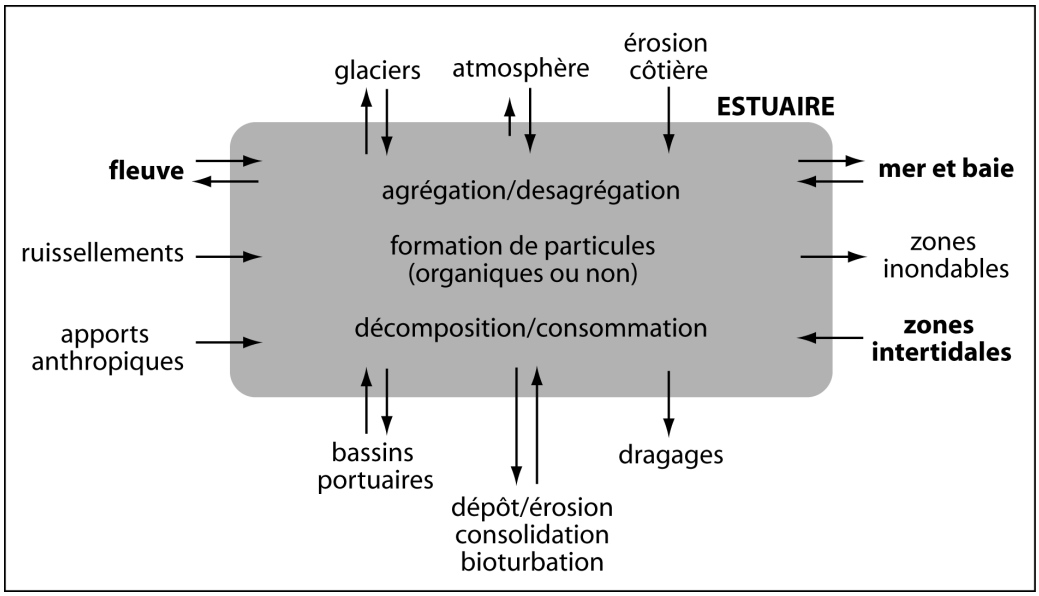


Figure 1.11. Différentes sources du matériel en suspension qui transite en milieu estuarien (Eisma, 1993).

Figure 1.11. *Different sinks of suspended material transported in the estuarine domain (Eisma, 1993).*

L'origine des sédiments fins dépend donc du système estuarien considéré, du contexte climatique local mais également des actions anthropiques auquel il est soumis. On peut noter cependant deux origines principales : une source marine et une source continentale en provenance du bassin versant. Le remaniement doux de la surface des vasières et les évènements érosifs des marais salés dus à la divagation des chenaux sont également responsables d'une réinjection considérable de

sédiments dans la balance sédimentaire. Ce recyclage rend difficile la distinction des sources, l'évaluation des apports respectifs et donc les possibilités de prédiction.

Contrairement aux sables chimiquement inertes, les sédiments fins ont un comportement dit cohésif qui engendre, comme nous le verrons par la suite, une large gamme de capacité de transfert. Leur capacité de cohésion dépend de leur taille (Tableau 1.2) mais également des propriétés physico-chimiques de leur surface.

Tableau 1.2. Propriété de cohésion des matériaux fins (Mehta et Li, 1997).

Table 1.2. *Cohesion properties of fine materials (Mehta and Li, 1997).*

Taille (µm)	Classification de Wentworth	Propriété de cohésion
40-62	Silts moyens à grossiers	négligeable
20-40	Silts fins à moyens	inversement proportionnelle à la taille
2-20	Argiles grossières à silts fins	forte
< 2	Argiles fines à moyennes	très forte

Les argiles ont notamment un fort potentiel de cohésion qui s'exprime au travers de la capacité d'échanges cationiques (CEC) et peut être évalué en terme de seuil de salinité pour l'agrégation (Tableau 1.3). Les sédiments fins peuvent donc former des agrégats de taille, structure, cohésion, composition et densité différentes suivant une dynamique liée aux processus de floculation/défloculation (Krone, 1962 ; Partheniades, 1962 ; Migniot, 1968 ; Pejrup, 1988 ; Van Lessen, 1988 ; Dyer et Manning, 1999 ; Winterwerp, 2002 ; Verney, 2006).

Tableau 1.3. Propriétés géométriques et physico-chimiques de quelques argiles (McAnally, 1999).

Table 1.3. *Geometric and physic-chemical properties of some clay (McAnally, 1999).*

Argile	Taille (µmxµm)	Capacité d'Echange Cationique (meq/100g)	Seuil de salinité pour l'agrégation (‰)
kaolinite	1x0,1	3-15	0,6
illite	0,01x0,3	10-40	1,1
smectite	0,001x0,1	80-150	2,4
chlorite	0,01x0,3	24-45	-

Les sédiments au sein des domaines estuariens macrotidaux présentent généralement un mélange de sable et de particules fines, dont la proportion varie au cours du temps et dans l'espace. On observe généralement une décroissance longitudinale et latérale de la taille des particules, d'aval en amont et du centre vers les marges de l'estuaire, due à une diminution significative de l'agitation liée à la houle et à l'amortissement de l'onde tidale au cours de sa propagation. Le dépôt des sédiments fins s'effectue donc de façon préférentielle en fond d'estuaire et en position abritée vis-à-vis des principaux agents dynamiques.

2.2. TRANSPORT DES SEDIMENTS FINS

En raison de leur qualité d'interface entre continent et océan qui leur confère des caractéristiques hydrologiques et hydrodynamiques spécifiques, les estuaires possèdent une dynamique très particulière où les sédiments fins sont piégés par la pompe tidale et la circulation résiduelle. Les processus de mélange induisent l'érosion, le dépôt et le transport de sédiments à travers l'estuaire. Les particules peuvent passer un temps important en suspension (temps de résidence) avant d'être déposées ou évacuées vers la mer. Du fait de ses propriétés intrinsèques, leur transport et dépôt en milieu estuarien sont fortement liés à l'hydrologie (interaction eau douce/eau salée) et au régime hydrodynamique.

2.2.1. LES MATIERES EN SUSPENSION (MES)

Les sédiments fins font partie des matières transportées en suspension (MES). Les MES sont définies comme les particules qui peuvent être transportées naturellement en suspension dans les masses d'eau de par leur masse et taille (Krank et Milligan, 1992), les matériaux plus grossiers étant quant à eux transportés principalement par charriage et saltation sur le fond. En règle générale, la taille des MES ne dépasse pas 400µm (Lafite, 1990) même si, en condition de forte agitation, on peut retrouver périodiquement une fraction de sable plus haut dans la colonne d'eau. Les MES sont composés d'éléments organiques et inorganiques qui peuvent être séparés en deux compartiments (Figure 1.12) : une fraction dissoute avec des éléments de taille inférieure à 45µm (colloïdes, macromolécules…) et une fraction particulaire de taille supérieure à 45µm (argiles, zooplancton…).

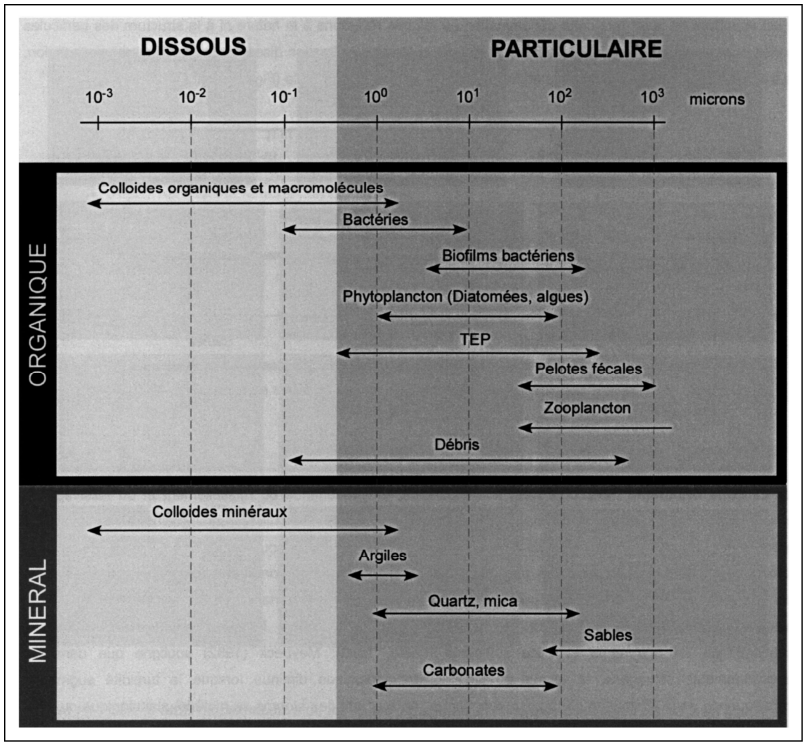


Figure 1.12. Taille des principaux constituants organiques et inorganiques des MES (Verney, 2006).

Figure 1.12. *Size of SPM principal inorganic and organic constituents (Verney, 2006).*

Le maintien et le transport des MES dans la colonne d'eau est fonction de la turbulence. Lorsque celle-ci décroît, les agrégats peuvent atteindre le fond et constituer un dépôt qui dépend de la quantité de MES disponible dans la masse d'eau. Ainsi, malgré l'extrême variabilité des vitesses de chute des particules constituant les MES (Figure 1.13) et des conditions hydrodynamiques, les périodes de plus faible agitation dans la masse d'eau permettent la décantation des MES et leur dépôt.

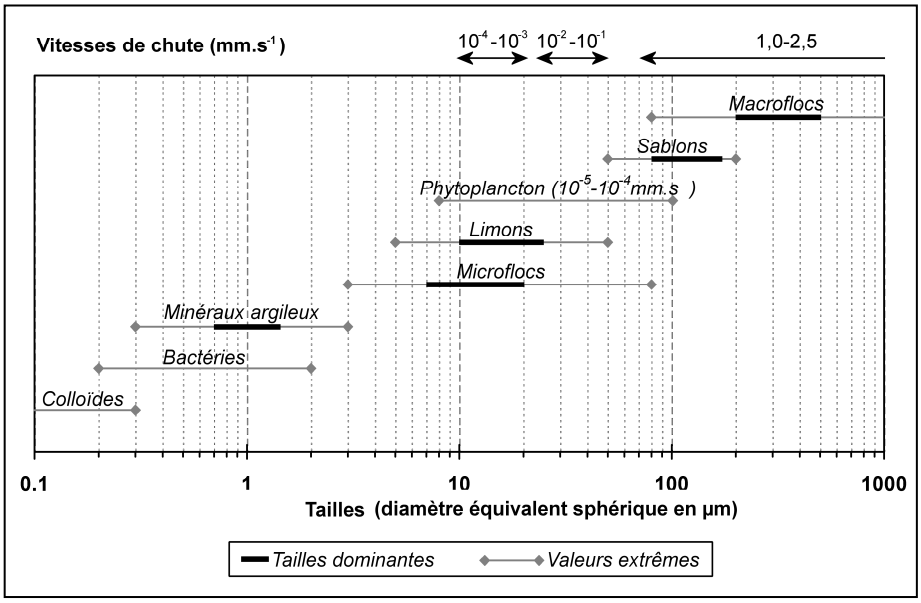


Figure 1.13. Evolution de la taille des MES en relation avec la vitesse de chute des particules (Dupont, 2001).

Figure 1.13. *Evolution of SPM size in relation with particle settling velocity (Dupont, 2001).*

2.2.2. LE MAXIMUM DE TURBIDITE

Les sédiments les plus fins transitent donc dans les masses d'eau et notamment par l'intermédiaire d'un maximum de turbidité. Le maximum de turbidité ou bouchon vaseux est défini comme la zone où les sédiments fins en suspension sont les plus concentrés. Des pics de concentration peuvent y atteindre 100 à 200 mg.l^{-1} dans un contexte de faible marnage et jusqu'à 1 à 10 g.l^{-1} en domaine macrotidal, indépendamment de l'apport en sédiment (Dyer, 1995). Sa formation est liée soit à la circulation résiduelle soit à l'asymétrie de la marée (Figure 1.14) ce qui complique le développement et la dynamique de ce type de mécanisme (Schubel, 1971).

Dans les estuaires stratifiés, généralement dans des contextes de marnage faible à modéré, le maximum de turbidité peut être attribuée au piégeage de particules par la circulation de gravité (Figure 1.14A) qui a lieu en amont de l'intrusion marine, au niveau du point nodal. Le maximum de turbidité matérialise l'obstacle que représente la circulation résiduelle sur le fond pour les particules en suspension venant de l'amont.

Dans les estuaires macrotidaux, le mélange vertical intense estompe le mécanisme de mise en place du bouchon vaseux par circulation résiduelle. Il peut cependant être observé temporairement dans des conditions conjointes de fort débit (crue) et de marées de mortes-eaux. En domaine macrotidal, son origine est donc principalement liée aux processus de remise en

suspension des sédiments par les marées (Figure 1.14B) au cours de leur propagation dans les estuaires. On parle alors de bouchon vaseux dynamique. Le jeu d'asymétrie des marées implique une étale de pleine mer plus longue que celle de basse mer et un flot plus court et plus puissant que le jusant (loi de conservation). Il résulte un transport préférentiel vers l'amont dû à cette pompe tidale. Ce bouchon est donc gouverné par plusieurs processus (Salomon et Allen, 1983 ; Sottolichio, 1999) : une remise en suspension et donc une masse particulaire dans la colonne d'eau plus importante au flot et une décantation plus importante des particules à l'étale de haute mer.

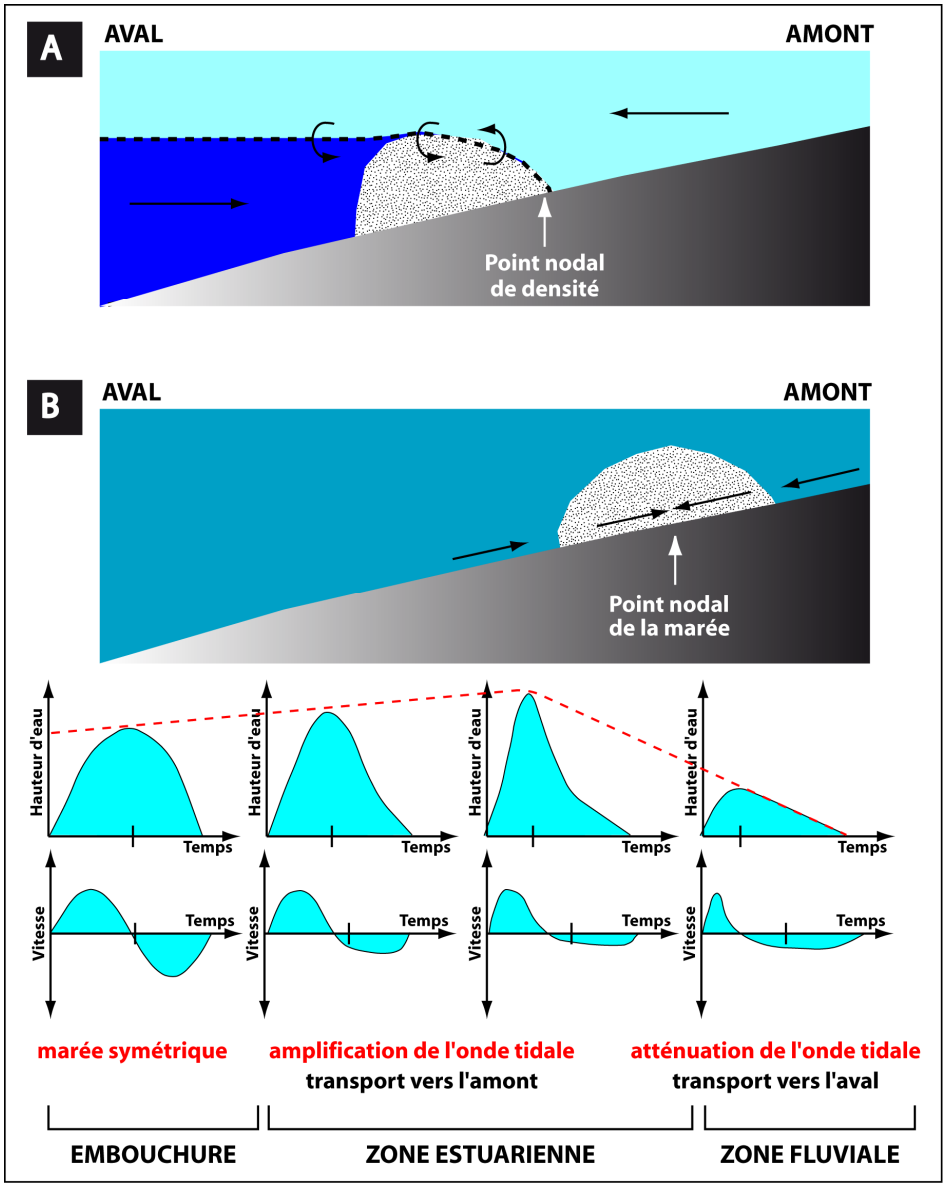


Figure 1.14. Formation du maximum de turbidité
A. Par circulation de gravité (d'après Dyer, 1997) ; **B.** Par asymétrie tidale (d'après Allen *et al.*, 1980).

Figure 1.14. *Turbidity maximum formation*
A. *Via gravitational circulation (from Dyer, 1997);* ***B.*** *Via tidal asymmetry (from Allen et al., 1980).*

Les bouchons vaseux affectent le taux d'accumulation de sédiment sur le fond et servent de centre de distribution de sédiments fins sur l'estuaire entier (Wells, 1995). La concentration et la position du maximum de turbidité varient en fonction du débit du fleuve (étiage et crues) et de l'intensité de l'énergie tidale (contextes de mortes et vives eaux) et répondent donc à des échelles de temps différentes. Les concentrations de particules en suspension moyennées sur un an sont cependant à peu près constantes ce qui laisse à penser que le temps de résidence des sédiments peut aisément dépasser une année (Dyer, 1995).

Le bouchon vaseux subit des migrations longitudinales. L'augmentation de l'intensité de l'écoulement fluvial déplace le maximum de turbidité vers la mer et entraîne une augmentation de la masse totale de sédiments en suspension mais une diminution de leur concentration, la section de l'estuaire devenant plus importante. On observe donc une variation saisonnière de la capacité de piégeage sédimentaire : les périodes de crue (automne-hiver) redistribuant les sédiments vers le domaine marin et les périodes d'étiage (printemps-automne) favorisant l'accumulation des sédiments dans la partie supérieure de l'estuaire. A une autre échelle et dans un même contexte général de marnage, le cycle de mortes eaux-vives eaux engendre de grandes différences dans l'amplitude des marées. Les marées de vives eaux, de forte intensité, érodent facilement les sédiments et entraînent une remise en suspension importante. Au contraire, les marées de mortes eaux favorisent leur sédimentation en raison de la création d'une turbulence moindre.

2.3. SEDIMENTATION FINE SUR LES ESPACES INTERTIDAUX

En domaine intertidal, la connaissance des caractéristiques des sédiments est primordiale afin de comprendre leur fonctionnement sédimentaire. Les processus de sédimentation, de tassement et d'érosion des sédiments cohésifs sont contrôlés par des interactions complexes entre les facteurs physiques, chimiques et biologiques et sont, de plus, soumis à une forte variabilité spatio-temporelle (Paterson *et al.*, 1998 ; Uncles *et al.*, 2000). De nombreux paramètres permettent de caractériser le sédiment naturel (Hayter et Mehta, 1982). Ces paramètres peuvent être séparés en deux groupes (Whitehouse *et al.*, 2000a) : les propriétés intrinsèques du sédiment (minéralogie, densité, granulométrie) et ses propriétés comportementales (érosion, dépôt, tassement suivant les conditions du milieu).

Parmi les propriétés intrinsèques du sédiment, l'analyse de la composition du sédiment, la connaissance de la répartition granulométrique, ainsi que la proportion du mélange entre sédiment

cohésif et non-cohésif sont fondamentaux. En raison d'un comportement différencié des sédiments, la connaissance des caractéristiques rhéologiques des sédiments des vasières intertidales est primordiale.

Dès que le sédiment est déposé au fond, en raison de sa cohésion (vase partiellement ou non consolidée), son tassement s'effectue sous l'effet de son propre poids (Migniot, 1989 ; Teisson *et al.*, 1993 ; Lesourd *et al.*, 2005). Ce mécanisme induit une augmentation de la densité du sédiment au cours du temps et une diminution de la porosité du sédiment par expulsion de l'eau interstitielle. Cette augmentation de densité est associée à une augmentation de la cohésion du sédiment, de sa résistance au cisaillement et donc à l'érosion. Le mécanisme de tassement est associé à la formation d'un profil de densité croissante vers le bas dans la colonne de sédiment (Figure 1.15A). A l'inverse, sous l'effet des vagues, la liquéfaction du sédiment peut provoquer une réduction de la cohésion du sédiment, associée à une augmentation de la pression interstitielle. Ce mécanisme induit le passage d'un état consolidé à un état de vase fluide (Ross, 1989 ; Maa et Mehta, 1990, Wit et Kranenburg, 1996, 1997 ; van Kessel et Kranenburg, 1998). En diminuant la cohésion du sédiment, ce processus favorise donc sa remise en suspension. Les relations existantes entre les différentes couches turbides sont schématisées en Figure 1.15B.

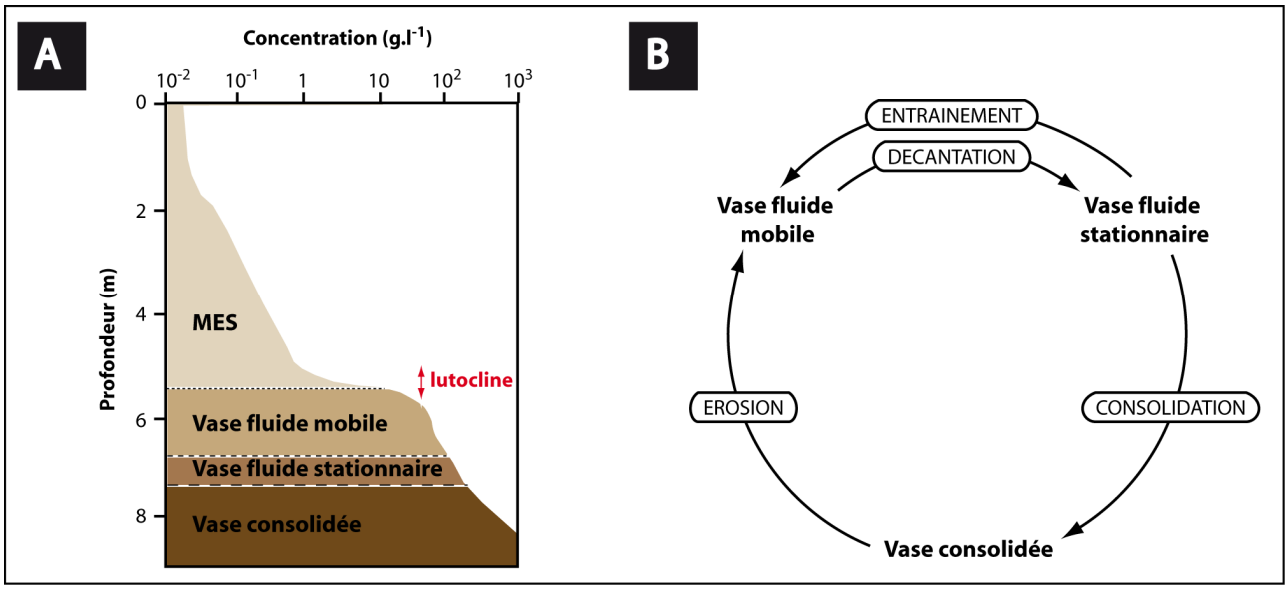


Figure 1.15. Formation et relation des différentes couches turbides
A. Profil vertical de concentration (d'après Ross et Mehta, 1989) ;
B. Relation entre les différentes couches turbides (d'après Kirby et Parker, 1983).

Figure 1.15. *Formation of and relation between different turbid layers*
A. *Vertical profile of concentration (from Ross and Mehta, 1989);*
B. *Relation between different turbid layers (from Kirby and Parker, 1983).*

L'érosion sur les vasières a lieu lorsque les forces de frottement de l'écoulement sont supérieures aux forces inter-particulaires du sédiment déposé. La remise en suspension des sédiments déposés est permise par les courants et/ou l'agitation. L'érosion est également fonction des propriétés du sédiment : une vase consolidée est plus difficilement remobilisable qu'un dépôt frais. Trois modalités d'érosion ont été décrites par Mehta (1991) en fonction de la relation entre la cohésion des vases et la contrainte critique de cisaillement au fond : l'entraînement, le détachement d'agrégats et l'arrachement de copeaux de vases. La première modalité d'érosion concerne les dépôts frais et les vases fluides. Les suspensions denses, localisées près du fond sont entraînées dans la colonne d'eau sans que la contrainte critique de cisaillement au fond soit importante. La deuxième a lieu lorsque la contrainte critique de cisaillement est atteinte, les agrégats sont alors détachés du fond et réintroduits dans la colonne d'eau. L'érosion d'une vase consolidée nécessite une contrainte critique de cisaillement au fond, plus importante. Ce dernier type d'érosion est à l'origine des galets mous et des plaques d'arrachement, ces dernières étant favorisées par les niveaux de sables interlités et les fentes de retrait. La présence d'organismes vivants interagit avec les agents dynamiques en modifiant l'écoulement des fluides et en stabilisant et/ou déstabilisant les dépôts sédimentaires (Figure 1.16). Ces interactions sont multiples et complexes : exercice de flux attractifs sur la colonne d'eau liée à la nutrition des Bivalves, intégration de nouvelles particules au substrat par la bioturbation réalisée par les Annélides, ralentissement des vitesses des courants due aux appareils végétatifs parfois importants des végétaux, stabilisation des sédiments fins par la couverture microphytobenthique et le développement des appareils racinaires.

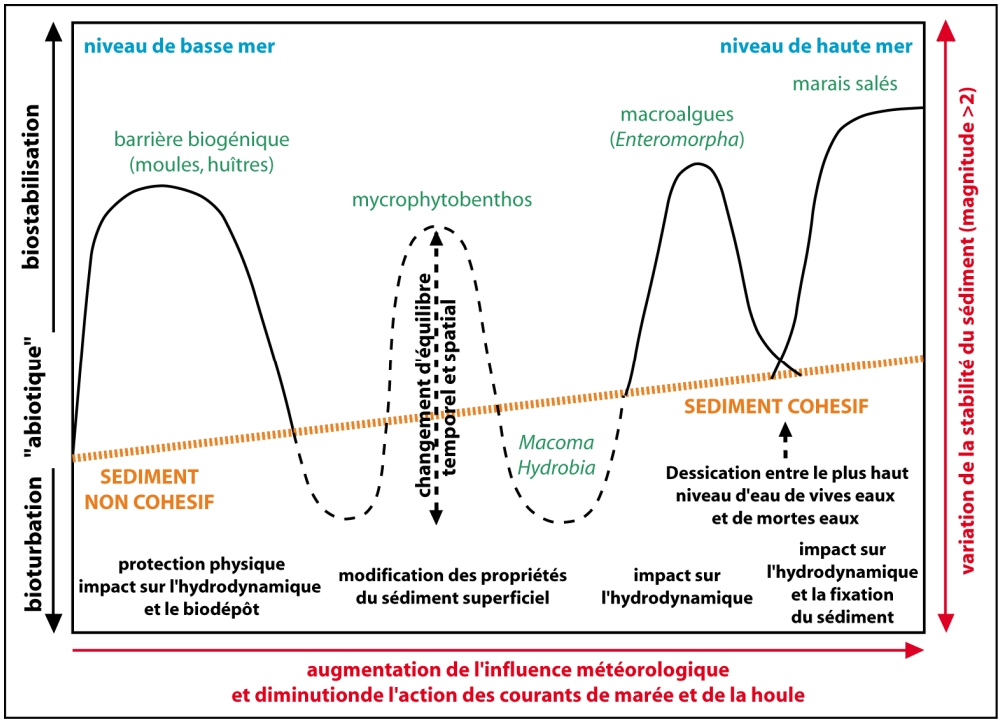


Figure 1.16. Exemple d'interactions entre échelle spatiale et processus en action (Widdows et Brinsley, 2002).

Figure 1.16. *Examples of interactions between spatial scales and active processes (Widdows and Brinsley, 2002).*

3. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE : L'ESTUAIRE DE L'AUTHIE

3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE GENERAL

3.1.1. GEOLOGIE

Un résumé de l'histoire géologique du bassin de la Manche et de ses bordures a été réalisé par Hamblin *et al.* (1992). À la suite de l'érosion de la chaîne hercynienne, la région, soumise aux contre-coups de l'orogenèse alpine, est affectée par des modifications topographiques. La principale est le soulèvement de l'anticlinal Weald-Artois. Commencé au Crétacé inférieur, la fin de ce soulèvement, au début du Cénozoïque (Tertiaire) au plus tôt selon Mansy *et al.*, 2003, créé l'isthme du Pas de Calais qui s'étend jusqu'au Cotentin. Le bassin de Londres-Bruxelles est alors définitivement coupé de celui de Paris. L'orientation Sud-Est – Nord-Ouest des failles explique vraisemblablement le parallélisme global des cinq fleuves de cette côte : l'Yères, La Bresles, la Somme, l'Authie et la Canche (Dobroniak, 2000). On peut noter que l'Authie change brusquement d'orientation, ceci serait expliqué par la présence locale d'un jeu de failles (Louche, 1996).

De la baie de Somme à la frontière belge, la zone littorale est composée de trois unités géologiques distinctes (Colbeaux *et al.*, 1977 ; Clique, 1986) (Figure 1.17). Au Sud, le synclinal Weald-Hampshire constitue la Manche orientale (Robert, 1971). En position intermédiaire, l'anticlinal jurassique Weald-Artois ainsi que la zone de cisaillement Nord-Artois (Colbeaux, 1974) ou front varisque (Preece *et al.*, 1990) marquent le littoral. Enfin, au Nord, le bassin de Londres-Brahant constitue la partie méridionale de la Mer du Nord. Il s'agit d'un plateau crétacé et cénozoïque dont la partie orientale constitue en émergeant la plaine maritime flamande.

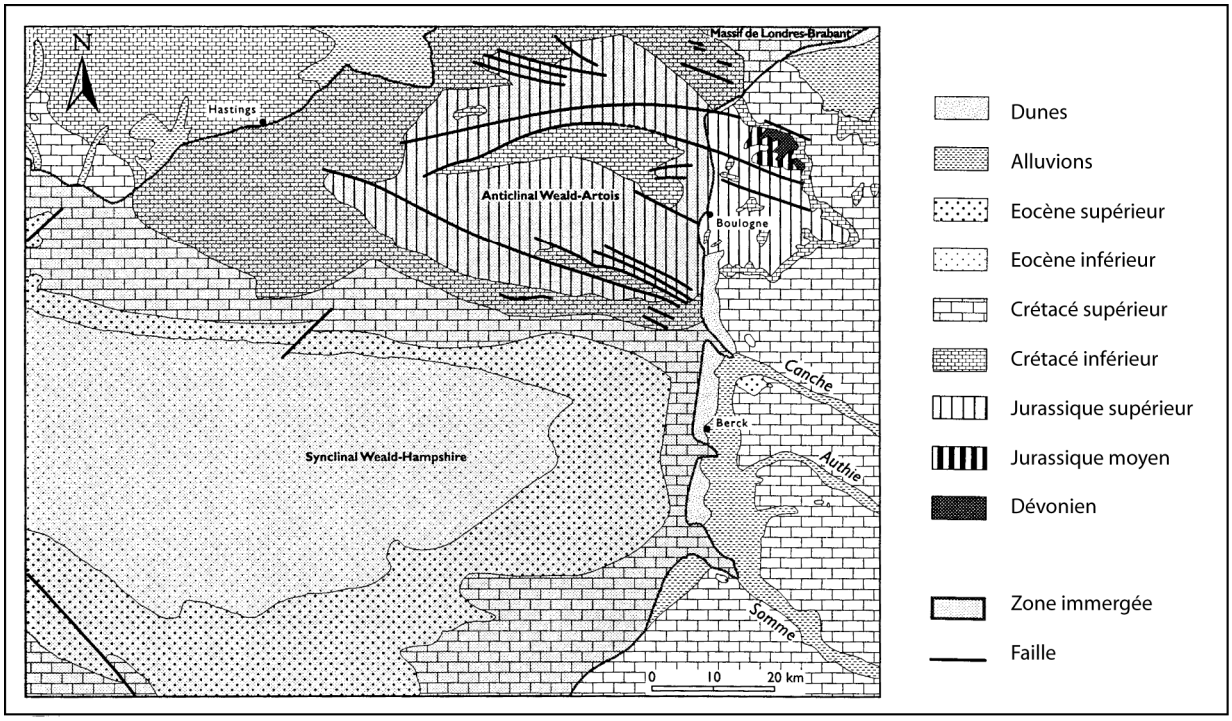


Figure 1.17. Carte géologique et structurale simplifiée de la zone côtière du Nord - Pas-de-Calais (Augris *et al.*, 1990).

Figure 1.17. *Simplified geological and structural map of Nord - Pas-de-Calais coastal area (Augris et al., 1990).*

3.1.2. MORPHOLOGIE CÔTIERE

Plusieurs cellules sédimentaires se dessinent sur le littoral du Nord-Pas-de-Calais bien que la définition de leurs limites s'avère souvent difficile en raison du régime macro- à mégatidal qui élargit la zone d'échanges sédimentaires au sein du profil côtier (Anthony *et al.*, 2003). La zone subtidale de ce littoral se compose d'une série de bancs tidaux hérités ou actuels surmontés de mégarides (Figure 1.18). Ces bancs migrent activement vers le Nord, au Sud du cap Gris Nez, et vers l'Est après ce cap (Beck *et al.*, 1991 ; Augris *et al.*, 1995) dans un couloir de dérive sableuse

côtière entre la Somme et le Sud de la Mer du Nord (Anthony, 2002). Les zones intertidales sont dominées très largement par des plages à barres intertidales et par quelques vasières estuariennes. La frange littorale est quand à elle constituée de nombreux massifs dunaires entrecoupés de zones urbanisées. L'artificialisation du littoral n'est présente sous une forme avancée que sur la façade de la Mer du Nord, notamment avec le complexe industrialo-portuaire de Dunkerque.

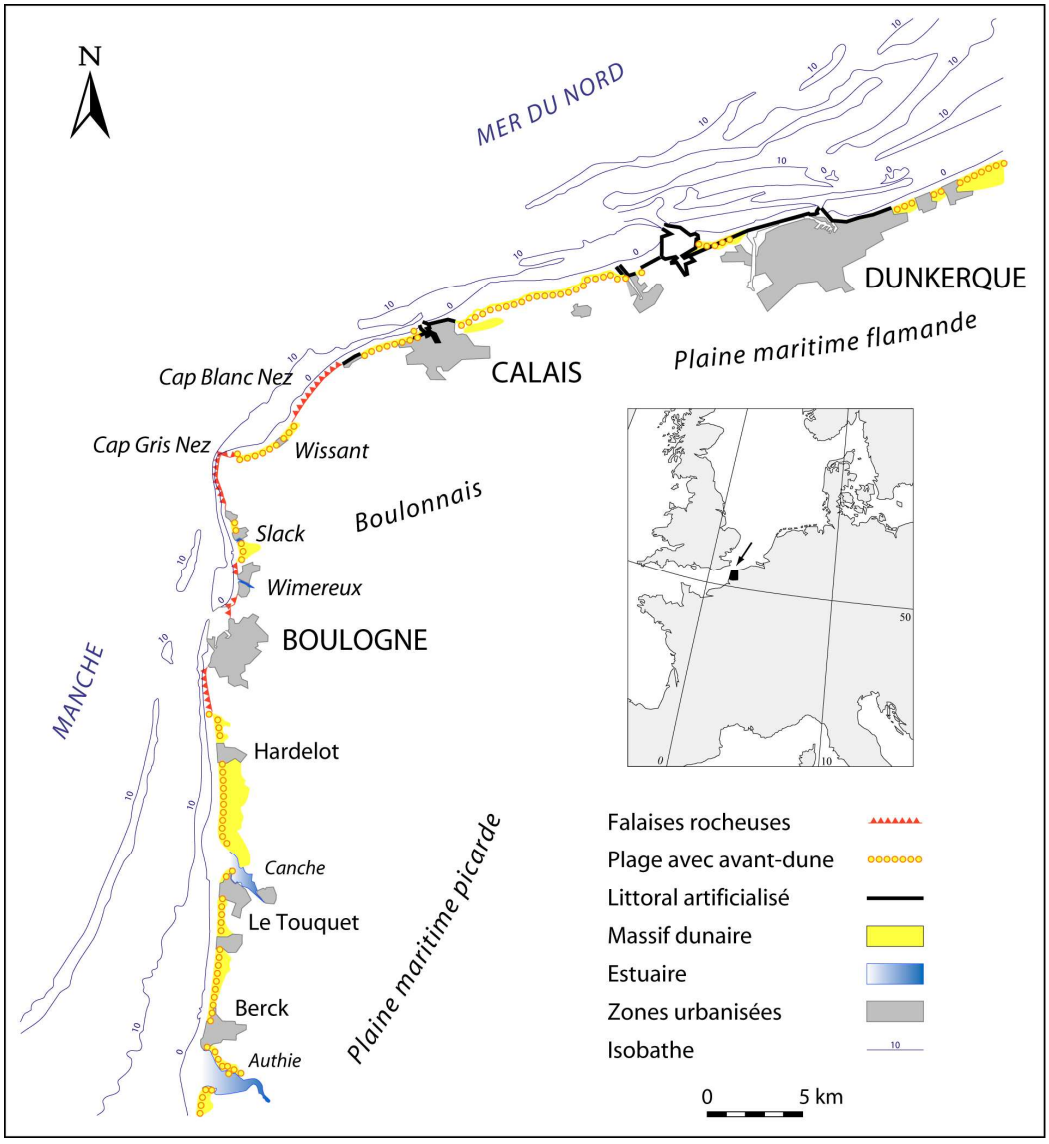


Figure 1.18. Morphologie du littoral du Nord – Pas-de-Calais.

Figure 1.18. *Morphology of Nord –Pas-de-Calais littoral.*

3.2. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES GENERALES

3.2.1. LE VENT

Dans l'ensemble, les données météorologiques MétéoFrance permettent de distinguer deux saisons bien distinctes : une période "estivale" relativement calme (mai-juin à octobre) et une période "hivernale" (de novembre à avril-mai). En saison "estivale", les vents faibles (inférieurs à 5 $m.s^{-1}$) dominent représentant entre 40 et 50% des observations pour cette période. Ces données font ressortir une moindre importance des vents de force intermédiaire (entre 5 et 10 $m.s^{-1}$), une proportion modérée des vents forts (moins de 20% des fréquences sont comprises entre 11 et 21 $m.s^{-1}$) et une quasi absence des vents très forts (supérieurs à 21 $m.s^{-1}$). La période "hivernale" est caractérisée par une recrudescence des vents forts qui atteignent plus de 30% des fréquences mensuelles. Cette saisonnalité est due au déplacement de l'anticyclone des Açores qui protège l'Europe de l'influence océanique en été.

La station météorologique la plus proche de l'Authie est située au Touquet, à 15 km environ, et a été suivie par MétéoFrance sur une période de plus de dix ans (Figure 1.19). Les vents les plus fréquents (24% des observations) et les plus forts (dépassant 8 $m.s^{-1}$) proviennent du secteur Sud à Sud-Ouest suivis de vents plus modérés (5 à 8 $m.s^{-1}$) de secteur Est-Sud-Est (20% des observations). Les vents de mer sont prédominants et présentent les vitesses les plus élevées. La station de Boulogne (40 km au Nord de l'Authie) met également en évidence une prédominance des vents de secteur Sud à Sud-Ouest mais également l'importance des vents de secteur Nord à Nord-Est.

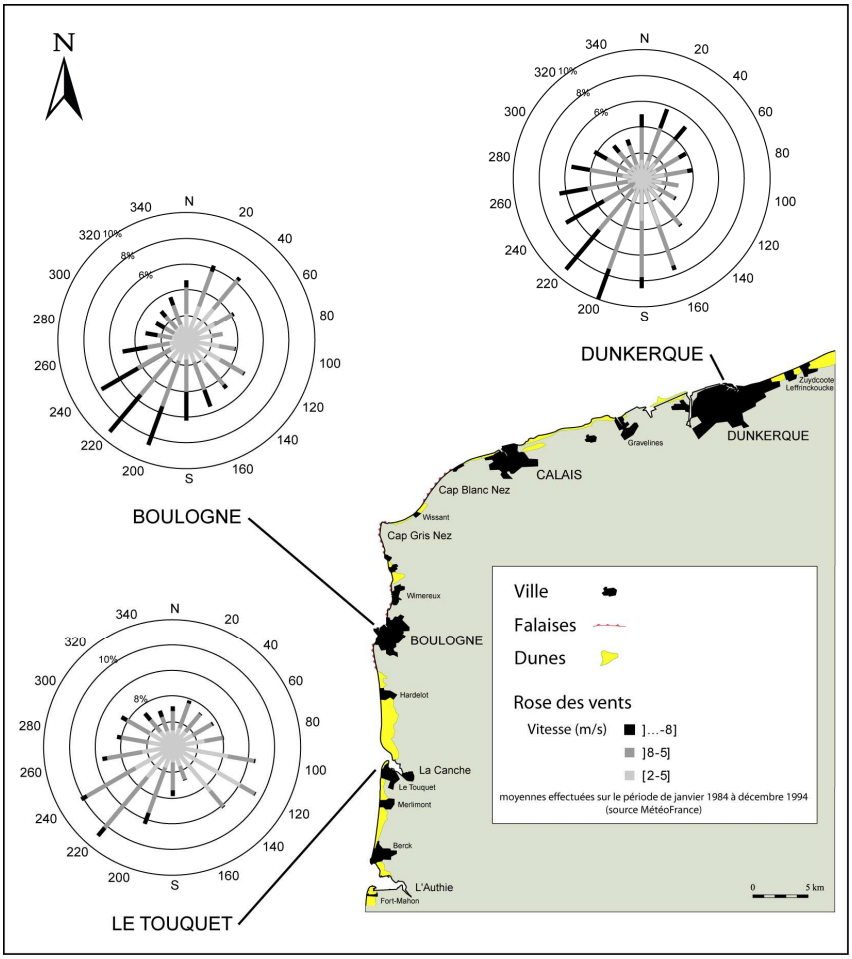


Figure 1.19. Roses des vents pour la façade de la Côte d'Opale sur la période 1980-1994 (Source MétéoFrance, Données statistiques N°11 in Sipka, 1998).

Figure 1.19. *Wind roses for the Côte d'Opale shore over the period 1980-1994 (Source MétéoFrance, Données statistiques N°11 in Sipka, 1998).*

3.2.2. LA HOULE

Il n'existe malheureusement pas de mesures houlographiques à proximité de l'Authie. Cette lacune est cependant compensée par la compilation de données régionales (MétéoFrance, 1991) issues de navires et d'une station radar au Touquet ainsi que par houlographe devant Boulogne sur Mer et au niveau du banc de la Bassurelle. On constate que les houles les plus fréquentes sont de secteur Ouest-Sud Ouest à Ouest et calquées sur les vents (Figure 1.20).

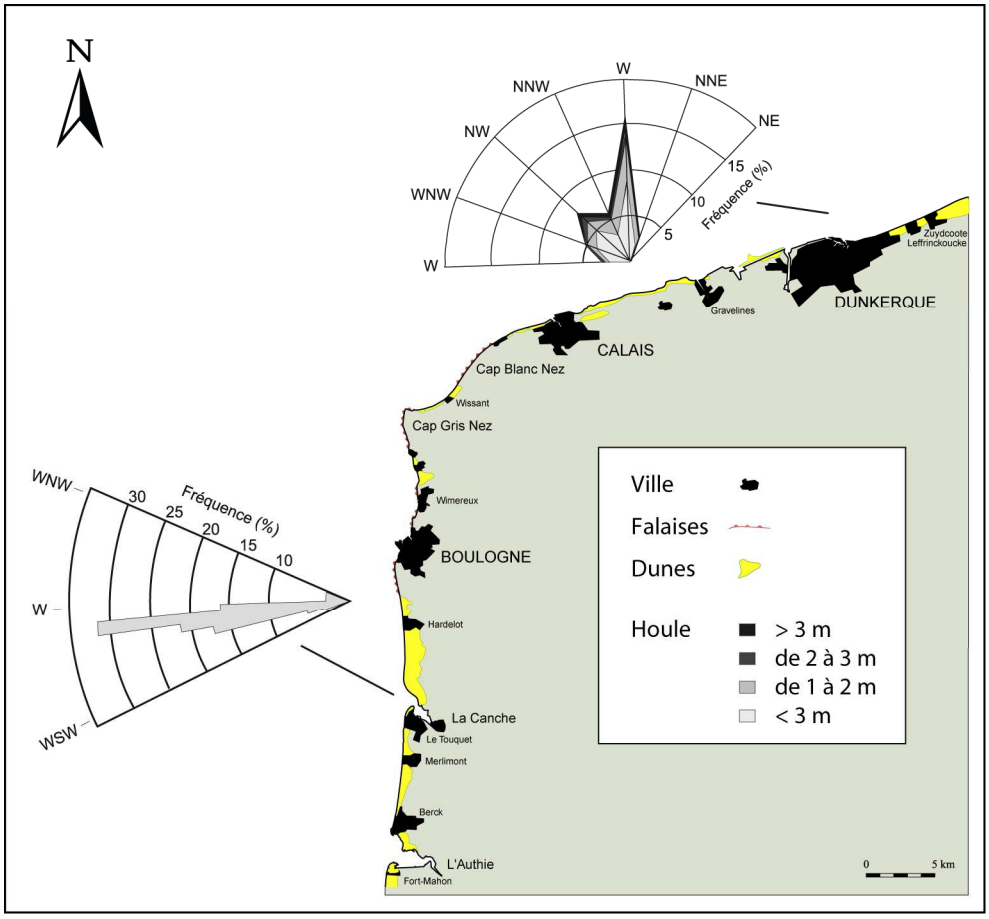


Figure 1.20. Rose des houles (Bonnefille et Allen, 1967).

Figure 1.20. *Wave roses (Bonnefille and Allen, 1967).*

Des mesures houlographiques plus récentes sur le site de Merlimont (Levoy *et al.*, 1998 ; Sipka, 1998 ; Anthony *et al.*, 2004, 2005a) à 8 km au Nord de l'estuaire, confirment cette orientation générale et indiquent que les houles les plus fortes et fréquentes proviennent du grand secteur Ouest. Au large de Boulogne sur Mer, 50 % des mesures présentent des hauteurs de houle comprises entre 0,8 et 1,2 m de deux périodes différentes : de 8 à 9 s et de 10 à 12 s pour la moitié des observations respectivement (Deboudt, 1997). Dans le même temps et près de la côte, 75 % des mesures indiquent des hauteurs de houles de 0,25 à 1,2 m avec un période de 7 à 8 s. Ces périodes correspondent à des fetchs intermédiaires et comportent des vagues courtes générées par des conditions météorologiques agitées du bassin réduit de la Manche et les houles plus longues provenant de l'Atlantique. Cette atténuation considérable de la houle a été remarquée également sur Merlimont. Il est important de tenir compte de la nature peu profonde de la Manche mais également de la présence des nombreux bancs subtidaux qui réfractent et dissipent de façon complexe les houles du large avant qu'elles n'atteignent la côte (Aernouts, 2005 ; Chaverot, 2006).

3.2.3. LA MAREE

Le régime tidal de la Côte d'Opale est de type semi-diurne (dominante de la composante M2 suivie de S2), marqué par deux pleines mers et deux basses mers par jours avec une période moyenne de 12h 24min. L'onde de marée provenant de l'Atlantique se scinde en contournant les Iles Britanniques. La combinaison de ces deux ondes engendre une onde stationnaire par réflexion (Vicaire, 1991). La marée montre cependant des caractéristiques d'ondes stationnaire et progressive (Teissier, 1997) avec un décalage entre les maxima et minima de vitesse des courants et les niveaux de basses et hautes mers.

Le régime de marnage s'étend de macrotidal (Hayes, 1975 d'après Davies, 1964) à mégatidal (Levoy *et al*., 2000) du fait d'une amplification de l'onde marée sur la bathymétrie peu profonde de la Manche et du Sud de la Mer du Nord. Les marnages sont plus importants le long des côtes françaises par rapport aux côtes anglaises du fait de la force de Coriolis (Guilcher, 1979 ; Carter, 1988). En raison d'une réflexion en Manche occidentale, les marnages diminuent de plus du Sud vers le Nord sur le littoral français (Tableau 1.4).

Tableau 1.4. Evolution du marnage entre Berck et Dunkerque.
Table 1.4. *Tidal range evolution between Berck and Dunkerque.*

Coefficient	Berck	Boulogne sur mer	Calais	Dunkerque
45	5,03	4,62	3,97	3,94
70	7,07	5,84	5,22	4,57
95	8,51	7,02	6,37	5,6

Le marnage important est à l'origine des forts courants de marée (Figure 1.21) notamment à l'avant-côte. A ces marnages peuvent s'ajouter d'importantes surcotes ou décotes (Vasseur et Héquette, 2000) en fonction des conditions atmosphériques. Les tempêtes, les surcotes et les hauts niveaux d'eau semblent jouer un rôle particulièrement important sur la morphodynamique côtière (Chaverot, 2006).

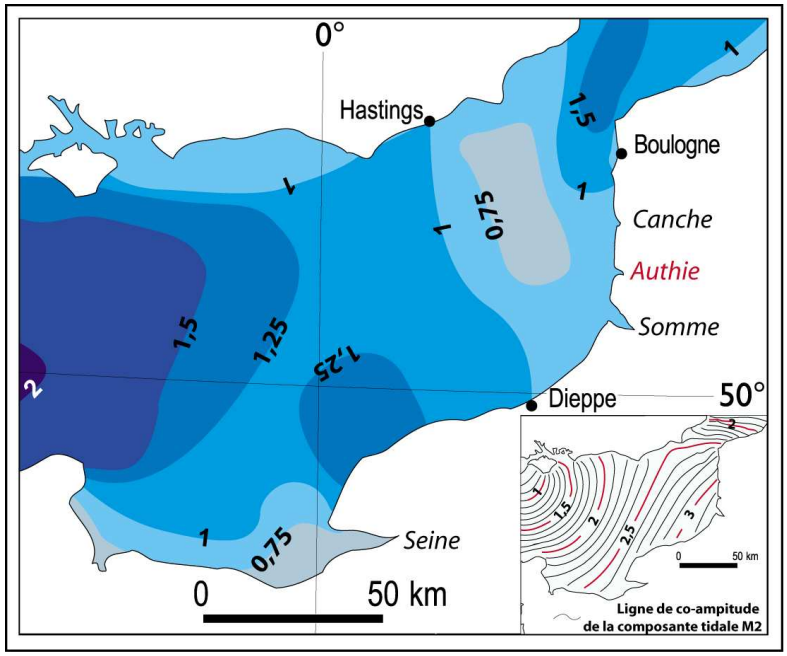


Figure 1.21. Vitesse des courants de marées en Manche (m.s^{-1}) (SHOM, 1968).

Figure 1.21. *Tidal current velocity within the English Channel (SHOM, 1968).*

3.2.4. IMPACTS SUR LES TRANSITS SEDIMENTAIRES A LONG TERME

Le fond de la Manche et de la Mer du Nord est considéré comme une surface d'abrasion marine (Larsonneur *et al.*, 1982 ; Curry, 1989). Il possède une couverture sédimentaire superficielle qui est constituée essentiellement d'un pavage de graviers et de blocs (Figure 1.22) dont l'épaisseur peut atteindre 1 m. Cette fraction très grossière disparaît localement pour laisser affleurer la roche mère le long de certaines parties au large des côtes normano-picardes. Par endroit, ces graviers sont recouverts par d'importantes accumulations de sables mobiles particulièrement importantes le long du littoral de la côte d'Opale (Augris *et al.*, 1995).

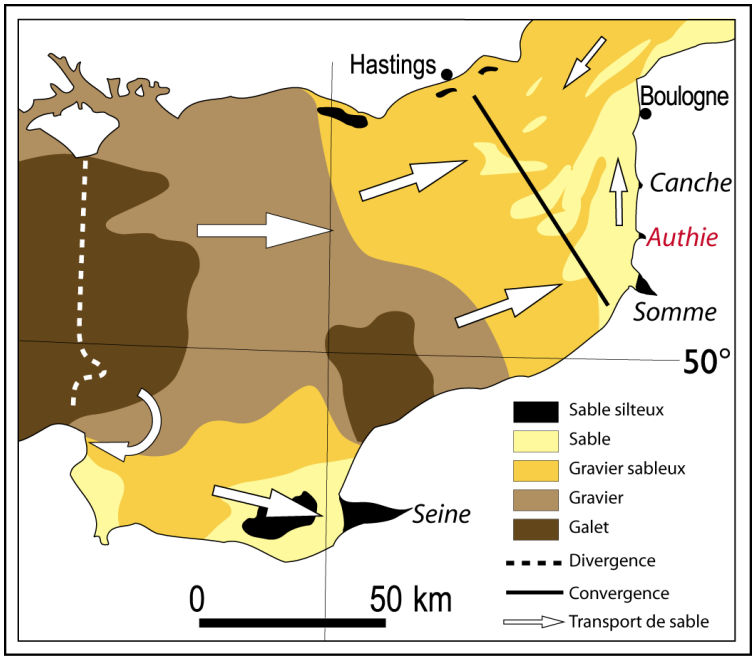


Figure 1.22. Couverture sédimentaire et transport de sable (Anthony, 2002).

Figure 1.22. *Sedimentary cover and sand transport (Anthony, 2002).*

La circulation hydrodynamique côtière montre des particularités intéressantes qui sont importantes dans la compréhension de la composition granulométrique, la morphologie et les tendances évolutives à long terme du littoral du Nord-Pas de Calais (Anthony, 2002) ainsi que sur la morphodynamique et le comblement des estuaires (Anthony *et al*., 2005). Sur un pas de temps long, cette circulation organise les stocks sédimentaires remobilisables au large en un schéma simple. Ce patron comporte des zones de partage et de convergence sédimentaire (Kenyon et Stride, 1970) dont l'existence est confirmée par la modélisation numérique (Grochowski *et al*., 1993a et b). On peut noter l'abondance de sable en domaine côtier des abords de la Somme jusqu'à la Mer du Nord (Anthony et Héquette, 2007) et son absence relative en deçà où la côte se caractérise par des plages de galets associées à des falaises (Anthony et Dolique, 2001). Contrairement à la baie de Seine, les estuaires de Picardie et de la côte d'Opale ne présentent pas de vasières subtidales à leur embouchure. On peut cependant remarquer une sédimentation fine importante (silts et argiles) en domaine interne.

3.3. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'ESTUAIRE DE L'AUTHIE

L'Authie est un petit fleuve côtier qui s'ouvre en Manche orientale (Figure 1.23A) entre les communes de Berck au Nord et de Fort-Mahon au Sud, formant ainsi le plus vaste estuaire du Nord-Pas-de-Calais. L'Authie, d'une longueur de 98 km, draine un bassin versant de 985 km^2. Les débits du fleuve sont faibles. Sur la période 1963-1992, le débit moyen inter-annuel a été estimé à 10,4 $m^3.s^{-1}$ et les débits de crues et d'étiages respectivement à 5,7 et 17,85 $m^3.s^{-1}$ (web Agence de l'Eau Artois-Picardie). Il faut noter aussi le débouché de deux autres cours d'eau : le Fliers à la Madelon et le canal des Mollières au niveau des marais salés de la rive Sud. Leurs débits respectifs ont cependant une influence négligeable sur le régime estuarien de l'Authie, de ce fait le débouché de l'Authie sera qualifié de façon plus appropriée d'estuaire et non de baie au sens strict du terme dans ces travaux. L'Authie correspond à la seule source continentale d'apports sédimentaires (Dobroniak et Anthony, 2001). La charge solide est cependant faible et correspond à un bilan d'apports annuels inférieurs à 12 000 t (SOGREAH, 1993 ; Latteux, 1999).

L'Authie est un estuaire macrotidal et nous choisirons même de le qualifier ici de mégatidal (marnage moyen en vive-eau à l'embouchure = 8,5 m) comme nous l'avons précédemment décrit. Globalement en forme d'entonnoir, l'estuaire présente une embouchure assez particulière avec cette flèche sableuse importante qui limite l'action des houles plus à l'intérieur. Cet estuaire mégatidal, avec des amplitudes de marée comprises entre 4,9 et 8,5 m, respectivement en morte-eau et vive-eau. Le marnage diminue rapidement au sein de l'estuaire : à 7 km de l'embouchure, les marnages moyens de mortes-eaux et de vives eaux ne sont plus respectivement que de 1,8 et 4 m, la limite de la marée dynamique se situant à 16 km de l'embouchure en période de vive-eau (Dobroniak et Anthony, 2002). Le fort hydrodynamisme qui le caractérise ainsi que les faibles débits fluviaux qui l'alimentent, font de l'Authie un estuaire à priori bien mélangé (Cameron et Pritchard, 1963). Cette caractéristique hydrologique ainsi que sa morphologie pourraient être favorables à une dynamique de transport vaseux par l'intermédiaire d'un maximum de turbidité qui n'a pas été identifié pour l'instant.

L'estuaire de l'Authie s'apparente à ces voisins de la Somme et de la Canche en raison de tendances évolutives communes. La dynamique de ces estuaires dits de type picard (Briquet, 1930) est caractérisée par deux phénomènes antagonistes. Ils présentent en effet une rive sud en accrétion et une rive nord en érosion entraînant ainsi un déplacement progressif de leur axe vers le nord (Figure 1.24). Cette évolution naturelle s'inscrit dans une longue histoire où l'occupation humaine

a joué un rôle essentiel. Comme de nombreux estuaires du nord de l'Europe, l'Authie a été très tôt anthropisé notamment à travers les entreprises successives de poldérisation, ce qui a entraîné des modifications majeures de sa morphologie au cours du temps et donc influencé fortement son l'évolution.

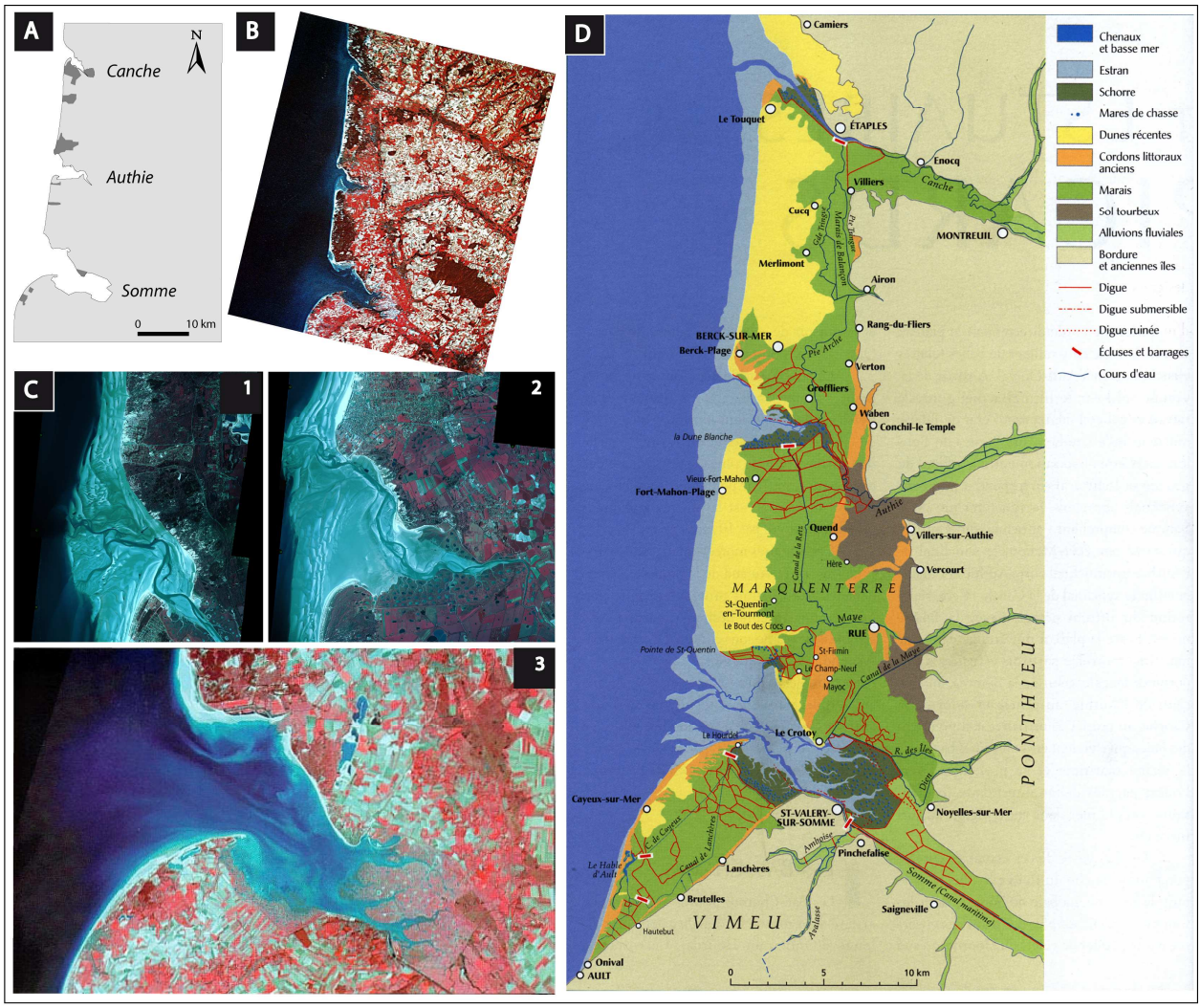


Figure 1.23. Les trois estuaires « picards » : Somme, Authie et Canche.
A. Localisation ; **B.** Image satellite (SPOT, 1991) ; **C.** Photographies aériennes (SIG Littoral, 2000) : **1.** Canche, **2.** Authie et **3.** Somme ; **D.** Cartographie des marais et espaces estuariens picards (Verger, 2005).

Figure 1.23. *The three « picard » estuaries: Somme, Authie et Canche.*
A. *Location;* ***B.*** *Satellite picture (SPOT, 1991);* ***C.*** *Aerial photographs (SIG Littoral, 2000):* ***1.*** *Canche,* ***2.*** *Authie and* ***3.*** *Somme; D. Map of salt marshes and « picard » estuarine areas (Verger, 2005).*

L'estuaire de l'Authie présente un comblement sédimentaire avancé dû à des apports massifs de sables résultant de l'action combinée de la houle et des courants de marée, principaux agents dynamiques responsables de leur acheminement aux abords et vers l'intérieur de l'estuaire.

En rive sud, l'importante plate-forme sableuse sub- à supra-tidale sur laquelle repose la flèche littorale et qui entrave son embouchure témoigne de ce phénomène tout comme le développement d'une deuxième flèche sableuse située plus en amont et sur la rive nord. La sédimentation de l'Authie, comme celle de la côte, répond à des transits de sables de la Manche vers le sud de la Mer du Nord concentrés le long des côtes françaises. La sédimentation sableuse très active au niveau de l'estuaire interne fournit notamment un vaste substrat à forte accrétion qui favorise le dépôt actif des vases.

3.4. UN SITE ATELIER

Les études menées sur ce site, notamment par Dobroniak (2000), ont apporté des connaissances sur le fonctionnement physique de cet estuaire mais la nature du comblement holocène et une caractérisation fine des modalités de fonctionnement de ce type d'estuaire restent à établir. Bien que centrées sur les particules fines, les études entreprises dans le cadre de cette thèse ont été consacrées à l'estuaire de l'Authie dans son ensemble, de son embouchure à l'amont du fleuve et de son chenal principal aux zones poldérisées. La rive nord de cet estuaire présente cependant la dynamique la plus active (recul de la ligne de rivage, érosion/accrétion des estrans et progradation du schorre) a donc été privilégiée dans les acquisitions. Les données issues de la connaissance du comblement et du fonctionnement de cet estuaire peuvent apporter des éléments de compréhension de l'histoire environnementale des côtes du Nord-Pas de Calais, et de leur comportement morphosédimentaire actuel et futur. Ces côtes, tout comme la rive nord de l'estuaire, sont aujourd'hui largement en érosion malgré l'importance des stocks sédimentaires au large et un comblement très avancé des estuaires (Anthony *et al.*, 2005).

Les surfaces envasées offrent un substrat meuble, riche en matière organique, qui va profiter à l'installation d'une faune très particulière, adaptée à cet environnement physiquement contraignant et donc parfois peu diversifiée. Ces organismes vont cependant atteindre de très fortes densités et fournir ainsi des ressources alimentaires importantes et essentielles pour l'ensemble du réseau trophique. La compréhension de la nature des sédiments récemment déposés dans l'estuaire peut apporter des réponses sur les sources de matière sédimentaire et de polluants ainsi que sur les modalités de leur incorporation dans le stock sédimentaire. Une forte pollution peut en effet se mettre en place au niveau des espaces intertidaux en raison de l'affinité des particules fines avec une large gamme de contaminants (Boust *et al.*, 1991 ; Almeida *et al.*, 2005 ; Cundy *et al.*, 2005). La compréhension et la quantification des transports particulaires au sein des aires intertidales permettent de déterminer leur rôle en tant que puit ou source de polluants.

L'approche pluridisciplinaire prônée dans ce projet permettra non seulement de dégager des perspectives de recherche fondamentale sur un type d'estuaire particulier, mais aussi d'apporter des éléments de réponses aux questions préoccupantes de l'état de santé de nos côtes. Actuellement, il est urgent de mieux appréhender les conséquences des influences anthropiques sur la dynamique sédimentaire et les fonctions écologiques des estuaires. En effet, la dégradation de ces systèmes ainsi que la perturbation de leur dynamique ''naturelle'' (aménagement, pollution, changement global) peut engendrer des répercussions socio-économiques importantes.

CONCLUSION

La gamme des définitions et des classifications proposées pour les estuaires est le reflet de leur grande variété et de leur vocation d'objet d'étude pluridisciplinaire. En raison de la complexité des facteurs intervenant dans la dynamique estuarienne et de leur interaction, cette pluridisciplinarité des schémas de classification n'est pas remise en cause alors qu'une définition globale semble être devenue nécessaire dans un contexte de gestion intégrée des estuaires (législation, communication interdisciplinaire). Les classifications présentées ont sélectionnés des critères différents : elles mettent en avant une partie seulement des processus affectant les estuaires en raison de leur diversité et de leurs interactions encore mal comprises qui rendent une classification globale impossible pour l'instant. Pour pallier à ce manque, des modèles doivent être développés conjointement à l'élargissement de la paramétrisation des facteurs intervenant dans le fonctionnement de l'estuaire.

La dynamique de sédiments fins et cohésifs est particulièrement complexe du fait de leurs propriétés intrinsèques et du nombre de facteurs intervenant dans les processus de sédimentation /érosion. Cette complexité est accrue en milieu estuarien en raison des nombreuses interactions entre les facteurs physiques, chimiques et biologiques qui sont, de plus, soumis à une forte variabilité spatio-temporelle. La compréhension de cette dynamique est primordiale dans le but de comprendre le fonctionnement sédimentaire des aires intertidales estuariennes.

L'Authie montre des particularités qui offrent des perspectives de recherche originales, susceptibles de déboucher sur un modèle d'estuaire à dominance hydrodynamique mixte marée-houle, plus approprié pour des estuaires macrotidaux tempéré situés dans des domaines à forte disponibilité en sables et répondant à ces critères hydrodynamiques (estuaires de la Manche).

INTRODUCTION

L'objectif de ce projet est de déterminer les processus de sédimentation fine dans un estuaire soumis à des agents énergétiques importants selon une approche englobant différentes échelles spatio-temporelles.

Afin de mieux comprendre les mécanismes physiques responsables de la sédimentation de particules fines dans l'estuaire de l'Authie, une partie de ce projet est consacré à l'acquisition de données hydrosédimentaires nouvelles, à l'étude des particules en suspension dans les masses d'eau, à leur nature et à la quantification de leurs flux dans l'estuaire ainsi qu'à l'expression verticale de leur sédimentation.

Le travail exposé ici a nécessité un important effort méthodologique en raison de la diversité des processus et de leur large gamme d'action sur les objets étudiés. Il a été rendu possible grâce à la mise en place de suivis et par la recherche d'outils adaptés, leur développement ainsi que par de nombreuses collaborations.

1. APPROCHE PLURI-ECHELLE

1.1. DIVERSITE DES ECHELLES SPATIALES ET TEMPORELLES

Comme nous l'avons vu précédemment, un estuaire est composé d'une large gamme d'environnements sédimentaires : estrans sableux (plages), vaseux (vasières ou slikke), marais salés (schorre) et chenaux. Ces domaines sont soumis différemment aux agents énergétiques en action de part leur localisation longitudinale (amont/aval) et latérale (altitude, proximité de chenaux). Nous avons donc choisi de travailler par « thématique », généralement le long de profils, de la dune au chenal principal, et de stations fixes d'amont en aval afin de refléter la diversité spatiale du terrain.

Le transport et l'accumulation de sédiments fins sont également soumis à des variations à différentes échelles de temps. Sur le court terme, ces variabilités vont de la marée (cycle semi-diurne) à l'année (cycle hydrologique *sensu largo*).

Le phénomène de marée résulte de l'importance relative des forces attractives exercées par la lune et le soleil sur les masses d'eau et des forces centrifuges liées à un système en rotation. En raison des vitesses relatives de rotation de la lune et du soleil autour de la terre, ces

attractions entraînent différents cycles qui se développent sur des échelles de temps emboîtées (Teissier, 1997) :

- **cycle semi-diurne** (pleine mer/basse mer) de 12h25 minutes

- **cycle semi-lunaire** (morte-eau/vive-eau) de 14,76 jours

- **cycle lunaire** (grande vive-eau/petite vive-eau) de 27,55 jours

- **cycle semi-annuel** (solstice/équinoxe) de 182,6 jours

Les variations des amplitudes de marée se caractérisent donc par des variations cycliques de fréquences connues.

Le cycle hydrologique observé annuellement est quant à lui déterminé par l'alternance de périodes de crues (hautes eaux), de moyennes eaux et d'étiages (basses eaux) qui correspondent à des hauteurs d'eau et des débits plus ou moins importants du fleuve et donc à différents apports sédimentaires continentaux issus du bassin versant. Ces variations ont pu être observées grâce à la mise en place de suivis et aux relevés des réseaux de surveillance (Agence de l'Eau Artois-Picardie, IFREMER).

Il est cependant nécessaire de prendre en compte les échelles temporelles plus importantes, de la décennie au siècle afin d'appréhender de façon complète les processus en action et d'avoir une vision à plus long terme des évolutions possibles (Figure 2.1). Ceci a été rendu possible par l'investigation stratigraphique en étudiant l'agencement et l'âge des dépôts ainsi que par l'étude de photographies aériennes.

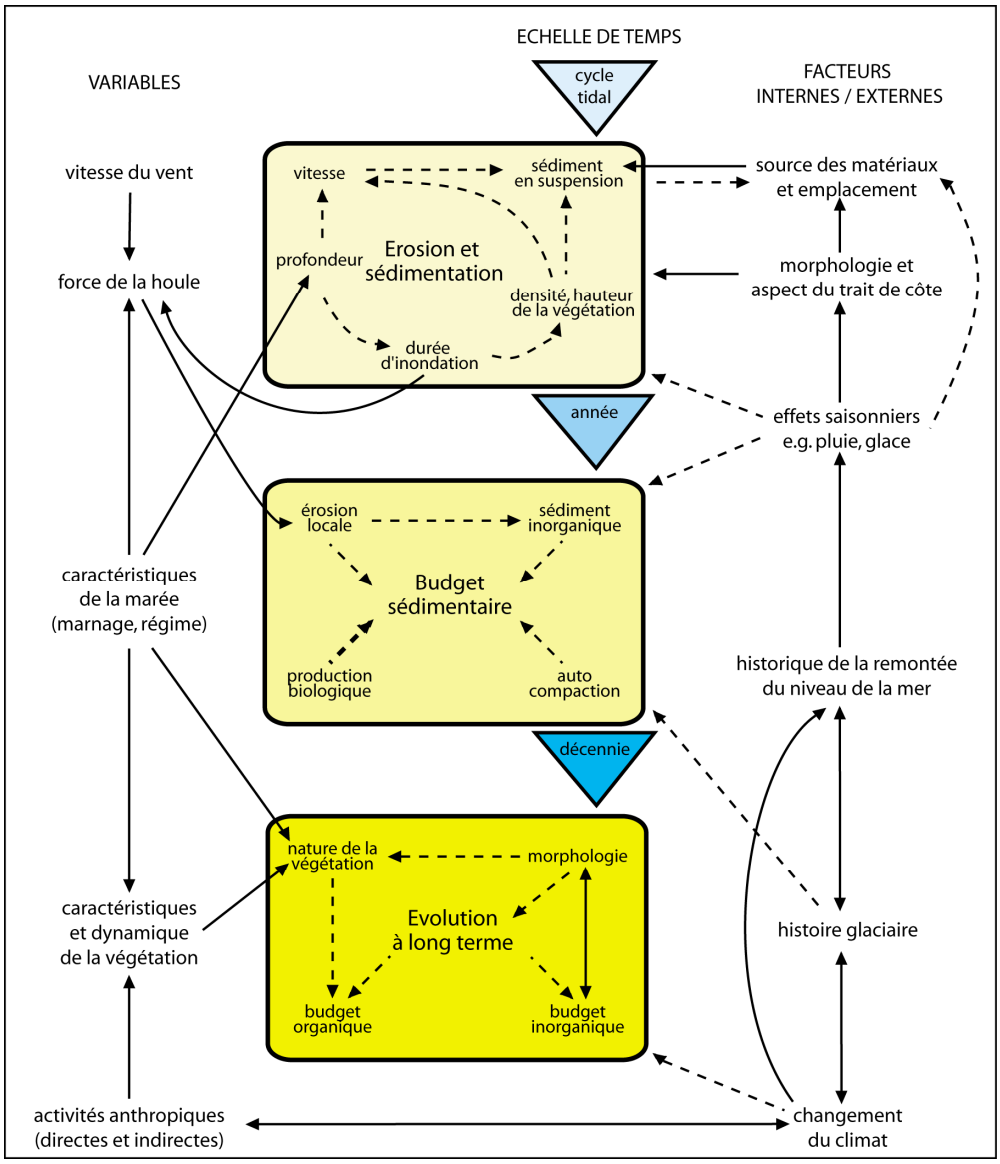


Figure 2.1. Exemple de relation entre échelle temporelle et processus en action : diagramme schématique des facteurs contrôlant la sédimentation sur un marais salé à trois échelles temporelles (d'après Davidson-Arnott *et al.*, 2002).

Figure 2.1. *Example of relationship between temporal scale and active processes: simplified diagram of factors controlling sedimentation over a salt marsh according to three temporal scales (from Davidson-Arnott et al., 2002).*

1.2. PLURIDISCIPLINARITE

Ce travail a été abordé avant tout comme une **é**tude pluridisciplinaire, mettant en jeu différentes techniques d'observation issues de champs disciplinaires variés. Ce n'est pas un rassemblement exhaustif de ces méthodes mais un choix raisonné d'investigations complémentaires permettant une analyse comparée et discutée des résultats obtenus.

Les programmes de recherche intégrant l'Authie ont établi un cadre favorable à cette direction de recherche. Ces études ont été supportées financièrement par le Contrat de Plan Etat - Région Nord-Pas-de-Calais 2000-2006 « *Dynamique et évolution d'un estuaire macrotidal tempéré et de ses abords côtiers : l'Authie, approche pluridisciplinaire et multi-échelle* » ainsi que par le contrat européen INTERREG III RIMEW « *Rive Manche Estuarine Watch* » 2002-2004.

Dans le cadre du CPER, tous les laboratoires associés travaillaient de concert sur un seul objet d'étude : l'estuaire de l'Authie. Nous avons donc entrepris un travail pluridisciplinaire, réunissant des chimistes marins (anciennement Laboratoire de Chimie Analytique et Marine : LCAM, Université des Sciences et Technologies de Lille aujourd'hui rattaché au PBDS), des géologues-sédimentologues (Laboratoire de Processus et Bilans des Domaines Sédimentaires : PBDS, Université des Sciences et Technologies de Lille) et des géographes physiciens lors de campagnes d'acquisitions communes et complémentaires. Ce travail a créé une dynamique forte entre nos laboratoires qui a autorisé ensuite très rapidement des études transdisciplinaires.

Pour RIMEW, l'objectif était de mettre en place des outils de surveillance des estuaires, aires sensibles et menacées par une pression anthropique grandissante (pollution, aménagement). Quatre estuaires ont été choisis afin de représenter la gamme la plus représentative possible des estuaires macrotidaux de la Manche tant du point de vue de leurs aspects structurels que fonctionnels. L'Authie a été sélectionné en raison de sa morphologie encore proche de ce qu'on pourrait appeler son état "naturel" et de son statut de haute qualité écologique, site considéré comme "propre" vis-à-vis des principaux polluants. Sur la côte française, RIMEW a intégré l'estuaire pollué et aménagé de la Seine et sur la façade anglaise de la Manche, l'estuaire de l'Ouse dans le Sussex, très aménagé, ainsi que celui du Medway dans le Kent, soumis à la pollution. Ce contrat a contribué à l'échange de savoir-faire pour la mise en place d'un suivi des zones estuariennes et ainsi rendre des inter-comparaisons ultérieures possibles. En ce qui concerne l'Authie, il a été particulièrement utile par le travail de l'UMR Morphodynamique Continentale et Côtière de l'Université de Rouen (données de l'altimètre ALTUS), du Center for Environmental Research de Sussex University (suivi de transport sédimentaire avec l'ESST et datation) et Greenwich University (calibration de l'ASM-IV).

Des outils complémentaires nous ont également été apportés par d'autres échanges ; nous citerons les structures impliquées lors de la description de ces techniques dans ce chapitre.

2. TECHNIQUES D'ETUDE

2.1. GEOREFERENCEMENT ET TOPOGRAPHIE

2.1.1. STATION ELECTRONIQUE

Des relevés topographiques ont été réalisés avec un tachéomètre Station Electronique LEICA TC600 à visée infra-rouge (marge d'erreur : ± 3 mm en distance et ± 0,0015° en direction) et d'une mire (Figure 2.2A et C).



Figure 2.2. Topographie au tachéomètre
A. « Mire » composé d'une perche surmontée d'un réflecteur ;
B. Acquisition d'un point sur le terrain par l'opérateur ; **C.** Tachéomètre installé en haut de dune.

Figure 2.2. *Topography using total station*
A. *Levelling staff;*
B. *Field acquisition of a referenced point by an operator;* ***C.*** *Total station deployed in upper dunes.*

Chaque point est géoréférencé en altitude en mètres IGN69 et géographiquement selon les coordonnées du système géodésique français Lambert I. Cela permet tout d'abord de localiser précisément les points d'acquisitions (instrument) et de contrôler le changement éventuel d'élévation des stations dans le cadre de suivi. La marge d'erreur en altitude a été estimée à ± 3 cm en intégrant à la fois la précision de l'appareil et les incertitudes liées à l'opérateur (Figure 2.3B) sur le terrain en estran sableux (Reichmüth, 2003) ce qui laisse supposer qu'elle est encore meilleure sur une vasière ou un marais présentant des substrats plus cohésifs et consolidés.

Des levés topographiques réguliers le long de radiales et en semis sur des surfaces importantes ont été également été effectués. A partir de ces nombreuses mesures, on peut

réaliser des profils topographiques précis mais également des modèles numériques de terrain (MNT). Les MNT, créés par triangulation avec interpolation linéaire à l'aide du logiciel Surfer (GOLDEN SOFTWARE), permettent d'obtenir une vision tridimensionnelle de la surface d'étude. Ces techniques ont surtout été employées pour caractériser la morphologie de la zone d'étude. Cependant, la comparaison de ces données sur deux acquisitions semblables fournit un différentiel qui permet d'identifier clairement les zones d'érosion/accrétion et de quantifier ce changement.

2.1.2. DGPS

En raison de la difficulté d'accès et du nombre important d'opérateurs nécessaire, le positionnement des différents sondages à quant à lui été effectué grâce à un dGPS (differential Global Postionning System). Nous avons utilisé le Pro XRS TRIMBLE (PBDS, USTL) qui reçoit les corrections différentielles en temps réel du service OmniStar (sur abonnement). La précision des mesures en altitude est de l'ordre de 30 à 50 cm mais peut descendre sous 20 cm par post traitement du signal. Cette précision est acceptable à l'échelle de l'ensemble de l'estuaire après une étude morphologique préalable mais reste cependant insuffisante pour des études plus ciblées où les relevés au tachéomètre restent indispensables.

2.1.3. LIDAR

LIDAR est l'acronyme pour « LIght Detection And Ranging ». Le LIDAR est une technique de télédétection "active" avec émission de lumière. Une partie de la lumière est diffusée ou absorbée par le milieu, l'autre est rétrodiffusée en direction de la source du rayonnement (Figure 2.3). Un LIDAR se compose donc d'un système laser chargé d'émettre l'onde lumineuse, d'un détecteur qui récoltera la composante rétrodiffusée, et d'une chaîne de traitement qui quantifiera le signal reçu.

Le télémètre laser émet un rayonnement à haute fréquence (jusqu'à 80000 Hz), dans l'infra-rouge proche (typiquement 1064 µm) en topographie et dans le visible (secteur vert 532 µm) en bathymétrie. La durée séparant l'émission et la réception du signal est représentative de la distance parcourue par ce dernier. La plate-forme (avion ou hélicoptère) est équipée d'un système de positionnement GPS qui détermine très précisément sa position et par conséquent celle de l'altimètre laser au cours de la télémesure, ainsi que d'une centrale de navigation interne à inertie INS (Inertial Navigation System), composée d'inclinomètres et

d'accéléromètres, utilisée pour déterminer les accélérations et les changements d'attitude du capteur occasionnés par les mouvements de l'aéronef au cours du vol.

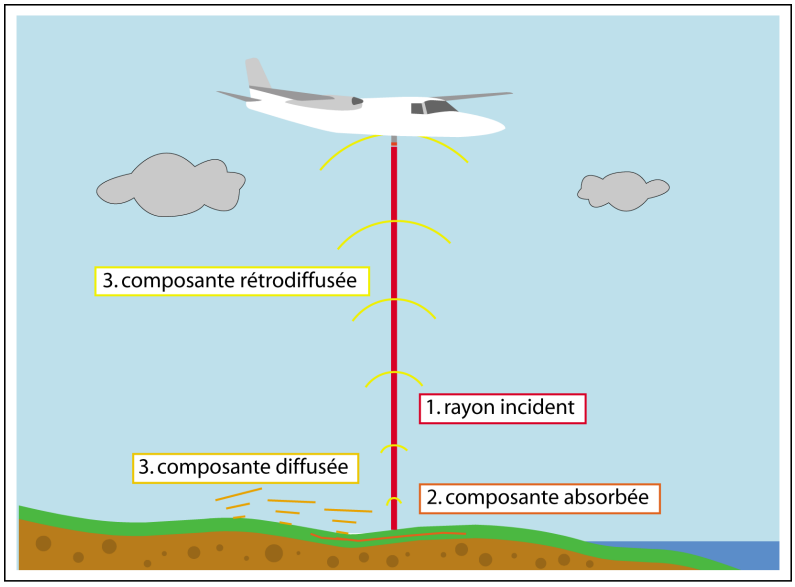


Figure 2.3. Principe de la mesure LIDAR.

Figure 2.3. *LIDAR measurement principle.*

Les axes de vol sont des lignes parallèles de recouvrement 30 %, qui doivent être les plus longues possible afin de diminuer la part relative des demi-tours. La largeur de fauchée est de 0,7 fois l'altitude, soit 700 mètres pour un vol à 1000 mètres. Le vol démarre un peu après mi-marée descendante de manière à descendre avec la marée. Le taux typique de couverture en zone côtière se situe à 30-40 km² par heure.

Cette campagne a été réalisée par EUROSENSE. Le vol s'est déroulé le 13/07/2006 de 9h22 à 9h33 et de 19h02 à 19h30. L'altitude de vol était de 1200 m au dessus du niveau de la mer et la vitesse de l'hélicoptère porteur du capteur LIDAR de 100 $km.h^{-1}$ environ. Les paramètres d'acquisition sont présentés en Annexe II-1. Il s'agit de la première mission de ce type sur ce site, qui présente de plus des environnements très diversifiés. La Région Nord-Pas de Calais ainsi que de nombreux programmes de recherche extérieurs sont intéressés par les résultats obtenus afin de renouveler les mesures dans le cadre d'un suivi ou d'engager des acquisitions similaires sur d'autres sites.

Avant de détailler les résultats, quelques éléments sur la validité des mesures LIDAR doivent être discutés brièvement. Trois profils (P1, P2 et P4) ont été relevés au tachéomètre durant la campagne aéroportée ce qui nous a permis d'appréhender les marges d'erreur

inhérentes à la technique, tout particulièrement au niveau du calage des altitudes. La comparaison et la corrélation existante entre les mesures LIDAR et tachéomètre sont rassemblées en Figure 2.4 pour chaque profil.

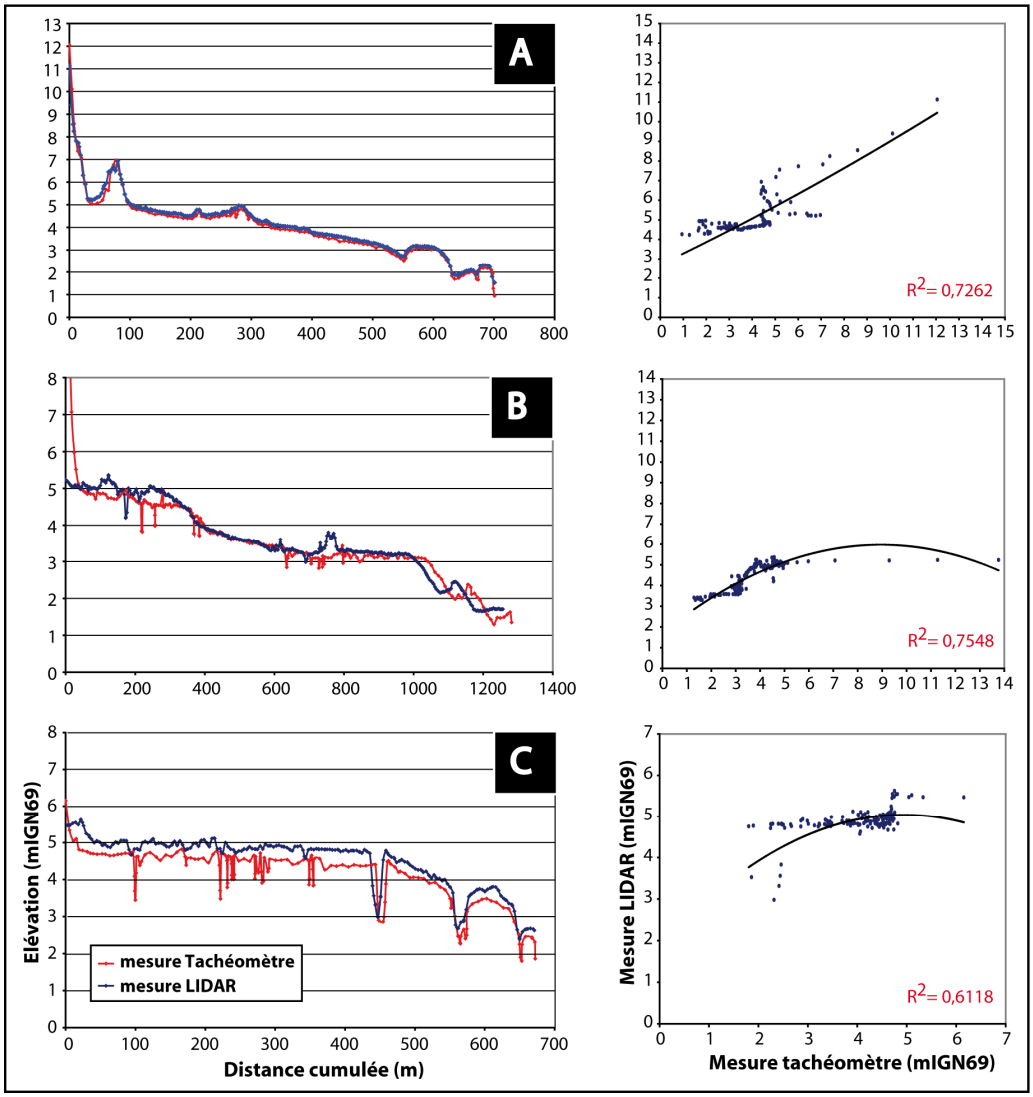


Figure 2.4. Comparaison des mesures au tachéomètre et au LIDAR sur le profil et corrélation **A.** Profil 1 : estran sableux ; **B.** Profil 2 : estran vaseux et marais salé ; **C.** Profil 4 : marais salés.

Figure 2.4. *Comparison of LIDAR and total station data over the same profile and correlation* ***A.*** *Profile 1: sandy tidal flat;* ***B.*** *Profile 2: salt marshes and mudflat;* ***C.*** *Profile 4: salt marshes.*

En prenant en compte l'importante teneur en eau des sédiments due au fort coefficient de la marée, la précision du LIDAR est de l'ordre de 10 cm pour un estran sableux (Figure 2.4A) et meilleure pour un substrat envasé (Figure 2.4B). La marge d'erreur est excessive sur les surfaces de marais (40 cm environ) (Figure 2.4C) et serait liée au type de végétation en place. Il semblerait que le signal ne puisse traverser l'épaisseur de la canopée arbustive de l'obione

en raison d'une trop grande densité végétative. De plus, la faible hauteur relative de cette végétation rend difficile la séparation des signaux retournés. La densité du semis de point (4 par m^2) rend la détection de certains chenaux difficiles en particulier ceux d'ordre 1, généralement étroits et profonds. Cette détection peut être aussi compliquée par les bordures végétalisées des chenaux ou la présence d'eau en fond de chenal.

Même si la répartition des points ne présente aucune anomalie, l'axe des deux profils mesurés (tachéomètre et LIDAR) se superposant parfaitement, certains décalages ont également pu être observés dans la morphologie des surfaces étudiées (Figure 2.4).

2.2. CARACTERISTIQUES DU SEDIMENT

2.2.1. GRANULOMETRIE

2.2.1.1. Bases théoriques

La granulométrie laser permet la mesure de la taille des particules constituant un échantillon de sédiment et de déterminer leur fréquence statistique. C'est une technique basée sur la diffraction de la lumière.

Elle s'appuie généralement sur la théorie de Fraunhofer qui utilise les hypothèses suivantes sur les particules étudiées :

- sphériques non poreuses et non opaques
- ayant un diamètre supérieur à la longueur d'onde
- animées d'un mouvement aléatoire
- diffractant la lumière avec la même efficacité quelque soit leur taille

Selon la théorie de Fraunhofer, l'intensité du rayonnement diffracté est une fonction du rayon des particules. L'angle de diffraction, défini par le premier point d'annulation, est d'autant plus grand que les particules sont petites.

Généralement, la limite de validité de cette théorie est atteinte pour des diamètres de particules de l'ordre de la longueur d'onde. Pour des particules de taille proche de la longueur d'onde utilisée, la théorie de Mie apporte une précision indispensable. Pour l'analyse de sédiments silteux et argileux, dont la taille des particules est inférieure à 63 µm, le modèle de Mie doit donc toujours être utilisé (Laibe, 2003). On suppose ici que le faisceau laser est non seulement diffracté par les particules, mais qu'il est également réfléchi et diffusé (Figure 2.5).

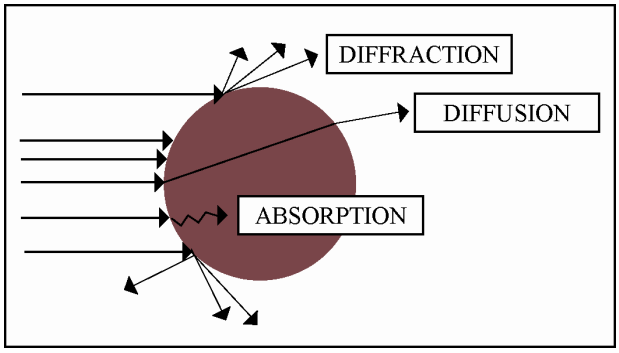


Figure 2.5. Interactions entre lumière laser et particule représentées par la théorie de Mie.

Figure 2.5. *Interactions between laser light and particle represented by Mie theory.*

Cela signifie que le faisceau laser traversant la cellule d'analyse va se propager sans modification jusqu'à ce qu'il rencontre une particule dont l'indice de réfraction est différent de l'indice du fluide de dispersion. Cette variation d'indice créé une réfraction du faisceau chromatique ; le faisceau arrivera sur une série de détecteurs photo-sensibles en ayant subi plusieurs variations de sa direction de propagation.

Cette théorie est donc plus précise pour l'analyse de fines particules ; en contrepartie, elle nécessite de connaître les propriétés optiques des particules et du milieu dans lequel elles se déplacent (Robbe et Roger, 1987; Jillavenkatesa *et al*., 2001). L'indice de réfraction est en fait un nombre complexe, dont la partie réelle (n) représente le rapport des vitesses par rapport à celle de la lumière, et la partie imaginaire (k) représente l'absorption du matériau. L'indice complexe est défini comme suit :

$$n^* = n\,(1 - ik) \qquad \textbf{[1]}$$

Si la partie imaginaire est égale à zéro, cela signifie que le matériau est transparent (Wedd, 2003).

2.2.1.2. Protocole expérimental

Nous avons utilisé un granulomètre laser MALVERN Mastersizer 2000 (PBDS, USTL) (Figure 2.6B) qui emploie la théorie de diffraction de Mie et travaille avec deux rayons émis par des sources de lumière différentes : un laser hélium-néon (He-Ne) pour la lumière rouge (diffusion avant, diffusion latérale et rétrodiffusion) et une diode pour la lumière bleue (diffusion avant aux grands angles et rétrodiffusion). Ce granulomètre laser est composé d'un système optique, couplé à un calculateur et d'un système de transport de l'échantillon à analyser à travers le faisceau lumineux. Un faisceau chromatique traverse une

cellule dans laquelle les particules à mesurer sont maintenues en suspension. La lumière incidente est diffractée par les particules puis reçue par une lentille qui renvoie l'image sur une cellule formée de multiples photo-détecteurs concentriques (Robbe et Roger, 1987).

Cet instrument permet la mesure de particules entre 0,02 et 2000 µm et semble ainsi adapté à la fois à la caractérisation de particules fines (argiles et silts) auxquelles nous nous dédions dans ces travaux et à l'analyse d'échantillons mixtes de sédiments tels que des sables vaseux ou des silts argileux comme présents souvent en estuaire de l'Authie. Même si nous nous intéressons plus particulièrement dans ces travaux aux particules de diamètre inférieur à 63µm, nous avons choisi de travailler sur des échantillons bruts de sédiment sans traitement préalable, ni décarbonaté, ni dépourvu de la matière organique. Le protocole expérimental est détaillé dans la Figure 2.6A.

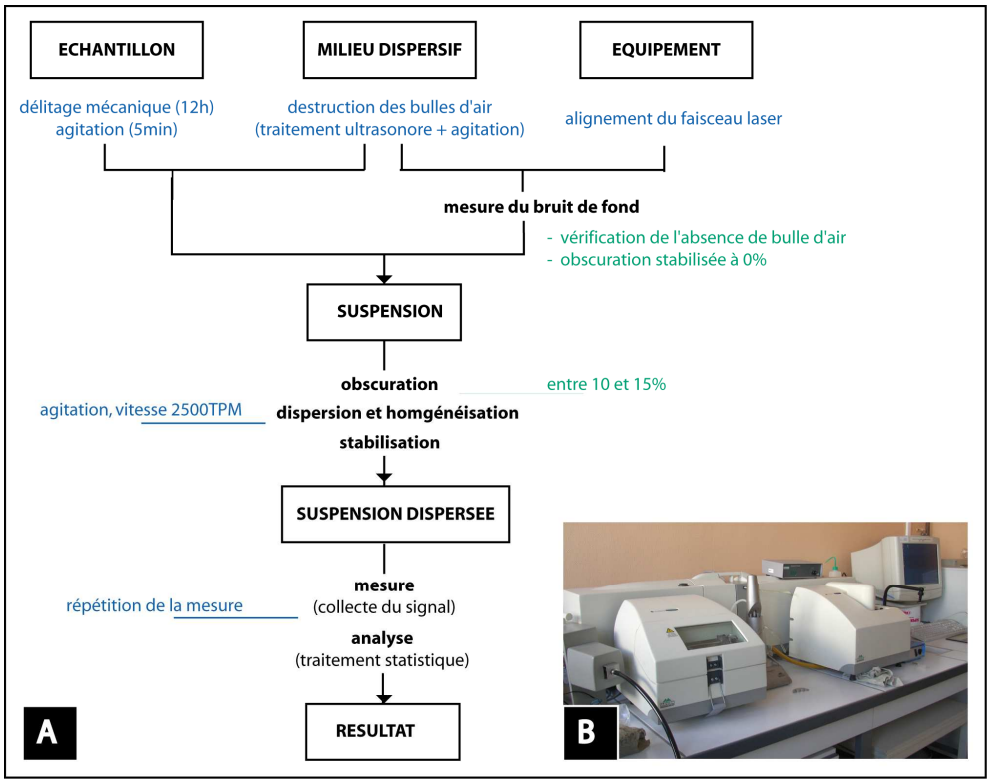


Figure 2.6. Granulométrie laser
A. Protocole de mesure ; **B.** Granulomètre laser MALVERN Mastersizer 2000 (PBDS, USTL).

Figure 2.6. *Laser grain-sizer*
B. *Measurement procedure;* ***B.*** *Grain-sizer MALVERN Mastersizer 2000 (PBDS, USTL).*

L'appareil réalise une mesure de bruit de fond afin d'enregistrer les phénomènes de diffraction engendrés par l'eau qui sert en général de dispersant. L'échantillon délité mécaniquement pendant 12 h puis agité 5 min est introduit directement dans la cuve d'analyse

puis la suspension est injectée dans la cellule de mesure. Chaque particule passant devant le faisceau lumineux dévie la lumière qui est ensuite analysée par des détecteurs, puis les données sont traitées par des calculs sur des matrices inverses.

2.3.1.2. Paramètres granulométriques

La granularité ou distribution du diamètre des particules a permis, dans un premier temps de déterminer le mode principal, c'est à dire la taille des particules la plus représentée sur l'échantillon et de définir ainsi la catégorie sédimentaire à laquelle le sédiment prélevé appartient selon la classification internationale dite de Udden-Wentworth (Wentworth, 1922) (Tableau 2.1).

Tableau 2.1. Classification des sédiments de Udden-Wentworth.
Table 2.1. *Udden-Wentworth sediment classification.*

Catégorie sédimentaire			Mode principal en Φ	Mode principal en mm
SABLE		Sables grossiers	0 - 1	1 - 0,500
		Sables moyens	1 - 2	0,500 - 0,250
		Sables fins	2 - 3	0,250 - 0,125
		Sables très fins	3 - 4	0,125 - 0,0625
FINES	SILT	Silts grossiers	4 - 5	0,0625 - 0,031
		Silts moyens	5 - 6	0,031 - 0,0156
		Silts fins	6 - 7	0,0156 - 0,0078
		Silts très fins	7 - 8	0,0078 – 0,0039
	VASE	Argiles	< 8	< 0,0039

Ensuite, les indices granulométriques suivants ont été calculés selon la méthode dite des moments statistiques (Boggs, 1987) (Figure 2.7) : le **grain moyen (G)** qui est un indicateur de l'éventail granulométrique moyen d'un échantillon, le **classement (S_o)** qui représente la dispersion des tailles par rapport à la moyenne et l'**asymétrie (S_k)** qui détermine la dominance des particules fines (asymétrie positive) ou grossières (asymétrie négative) par rapport à la moyenne.

Grain moyen ou *« Mean »* (1^{er} moment) : $$G = \bar{x}_{\Phi} = \frac{\sum fm}{n}$$

Classement ou **«** *Sorting »* ($2^{ème}$ moment) : $$S_o = s_{\Phi} = \sqrt{\frac{\sum f(m - \bar{x}_{\Phi})^2}{100}}$$

Asymétrie ou « *Skewness »* ($3^{ème}$ moment) : $$S_k = S_{k\Phi} = \frac{\sum f(m - \bar{x}_{\Phi})^3}{100\sigma_{\Phi}^3}$$

avec f : fréquence pour chaque classe granulométrique présente

m : point médian de chaque classe granulométrique en unité

Figure 2.7. Calcul des indices granulométrique par la méthode dite des moments statistiques.

Figure 2.7. *Formulae of grain-size indexes with the statistics moments method.*

Cette technique a été préférée à la méthode dite graphique en raison de sa plus grande fidélité, toutes les classes étant successivement prises en compte au lieu de quelques points de la courbe cumulée, et nous avons pris volontairement en compte la composition totale des échantillons. En effet, la méthode graphique sous-estime la fraction la plus fine et certains auteurs l'excluent lors du calcul de ces indices par la méthode des moments.

La granularité sera généralement exprimée en microns mais ces calculs nécessitent l'utilisation de l'échelle Φ de Krumbein où $\Phi = - \log_2$ [diamètre en mm] avec $\Phi_0 = 1$ mm (Krumbein, 1938).

2.2.1.3. Vers une qualification du milieu de dépôt et des tendances de transport sédimentaire

L'analyse de la granularité des sédiments nous permet d'obtenir le grain moyen (G), le classement (S_o) et l'asymétrie (S_k) de chaque échantillon de sédiment. Le grain moyen traduit l'intensité des agents dynamiques responsables de la mise en mouvement du sédiment. Le classement exprime l'action de tri effectuée au cours du transport et du dépôt, l'asymétrie étant quant à elle plutôt révélatrice du milieu de dépôt.

L'étude des variations spatiales de ces trois paramètres permet d'estimer les tendances du transport sédimentaire en utilisant la méthode développée par Gao et Collins (1992, 1994) qui permet d'établir un modèle vectoriel (direction et sens du transport). Les auteurs partent

de l'hypothèse suivante : une amélioration du tri est réalisée dans le sens du transport (McLaren, 1981).

Les étapes de la procédure analytique qui utilise une filtration semi-quantitative afin de conserver seulement les cas significatifs d'un transport réel sont décrites succinctement ci-après :

- Calcul de la distance critique (D_{cr})

C'est à dire de la distance maximale séparant deux sites adjacents en considérant l'ensemble de la grille d'échantillonnage. Deux sites sont dits voisins si leur éloignement est inférieur à cette distance et seuls ceux répondant à cette exigence sont considérés par la suite.

- Détermination d'un transport potentiel entre deux points voisins

L'utilisation de trois paramètres suggère l'existence de 8 combinaisons possibles (2^3). Seuls deux de ceux-ci sont retenus car ils révèlent un transport réel entre un point a et b d'après l'hypothèse formulée par les auteurs :

(Cas 1) $G_a > G_b$, $S_{oa} > S_{ob}$ et $S_{ka} < S_{kb}$

Sédiment plus grossier, d'asymétrie plus positive dans le sens du transport

(Cas 2) $G_a < G_b$, $S_{oa} > S_{ob}$ et $S_{ka} > S_{kb}$:

Sédiment plus fin, d'asymétrie plus négative dans le sens du transport

Dans notre étude, nous avons considéré la combinaison de ces deux cas.

- Carte vectorielle brute

Cette première carte est dessinée à partir des points répondant aux deux cas précédents et tous les vecteurs ont alors la même longueur.

- $1^{ère}$ filtration

Cette étape consiste à additionner les vecteurs possédant la même origine afin d'obtenir un seul vecteur pour chaque point. Les vecteurs possèdent désormais des modules différents.

$$\vec{R}(x,y) = \sum_{1}^{n} \vec{r}(x,y)_i \qquad \textbf{(5)}$$

- $2^{ème}$ filtration

Tout d'abord, une distance de calcul (D_{cl}) est estimée par l'opérateur en fonction de son appréciation de l'ensemble de l'environnement vectoriel. Celle-ci, supérieure à D_{cr}, permet de définir des sites dits adjoints. A chaque point, les vecteurs des sites considérés comme adjoints seront additionnés avant d'être divisés par le nombre d'adjoints ayant un vecteur non nul +1.

$$\vec{R}_{av}(x,y) = \frac{1}{k+1}\left[\vec{R}(x,y) + \sum_{1}^{k}\vec{R}_j\right] \quad \textbf{(6)}$$

avec k : nombre de sites adjoints possédant un vecteur, $\vec{R}_j$: vecteurs des sites adjoints et $\vec{r}(x,y)_i$: vecteur du point sélectionné

Il s'agit ici d'éliminer les bruits de fond qui peuvent être à l'origine d'anomalies dans les directions des vecteurs en les moyennant. D'autre part, cette étape permet d'attribuer des vecteurs aux points qui en étaient auparavant dépourvus. La réalisation de cette dernière étape conduit à l'obtention de la carte vectorielle finale.

2.2.2. COMPOSITION

2.2.2.1. Matière organique

La teneur en matière organique a été estimée par la technique de la perte au feu par calcination à 520°C (Whitehouse *et al*., 2000).

2.2.2.2. Carbonates

La teneur en carbonates est quantifiée grâce à un calcimètre Bernard. Il s'agit d'un appareil calcique simple qui permet de mesurer les teneurs en CO_2 dégagé lorsqu'un sédiment est mis en contact avec de l'acide selon la réaction :

$$CaCo_3 + 2\,HCl \rightleftharpoons H2O + CO_2\uparrow + CaCl_2 \quad \textbf{(7)}$$

On remplit une burette d'eau saturée en NaCl (afin de ne pas absorber le CO_2 dégagé) et on lit le volume initial (V_1). On met ensuite du sédiment finement broyé en contact avec l'acide. Le CO_2 dégagé pousse le liquide dans la burette jusqu'à un nouveau volume (V_2). Cette différence de volume (V_{CO2}) exprimée en cm^3 ou en ml est multipliée ensuite par un coefficient en fonction de la température ambiante et de la pression atmosphérique.

2.2.2.3. Argiles

Afin de déterminer les types présents d'argiles, nous avons utilisé un diffractomètre à rayons X PW 1729 PHILIPS (Figure 2.8A) dont les réglages sont optimisés pour travailler dans les petits angles (de 3 °2θ à 32 °2θ) où diffractent principalement les minéraux argileux. La baie de mesure (PW 1710) est pilotée par un micro ordinateur à l'aide du logiciel PC-APD.

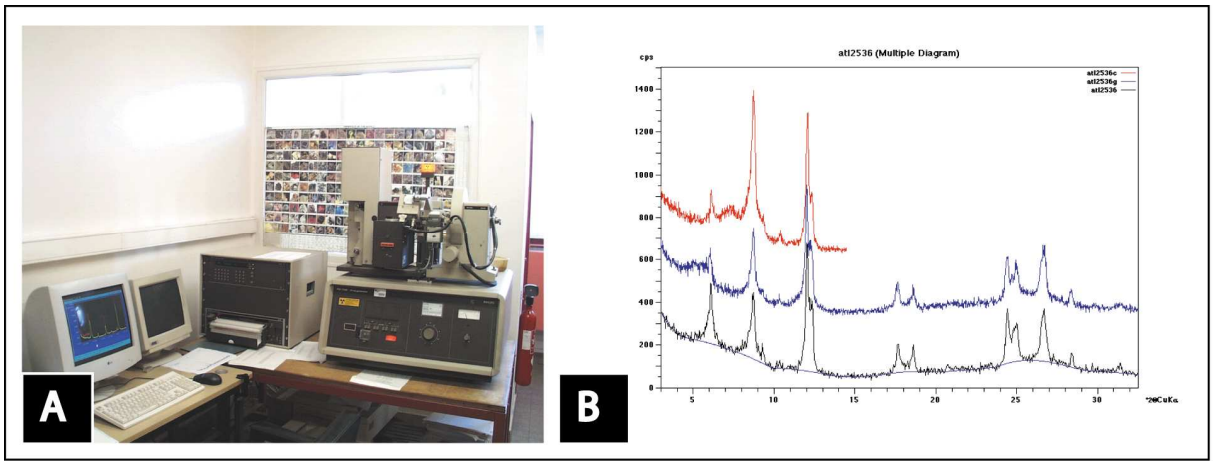


Figure 2.8. Diffractométrie à Rayons X
A. Diffractomètre (PBDS, USTL) ; **B.** Exemple de diffractogramme.

Figure 2.8. *X Rays diffractometry*
A. *Diffractometer (PBDS, USTL);* ***B.*** *Example of a diffractogram.*

Un diffractogramme est un graphique représentant en abscisses les angles de diffraction ou distance réticulaire (en °2θ ou en Å) et en ordonnée une intensité de diffraction de chaque pic caractéristique. On sait que chaque minéral possède une signature de distance réticulaire marquée c'est pourquoi on prend en compte les réflexions principales mais la kaolinite par exemple peut apparaître à 7 Å mais aussi à 3,58 Å.

Tableau 2.2. Distance réticulaire des minéraux argileux caractéristiques de l'Authie, essai normal.
Table 2.2. *Reticular length of characteristic clay mineral in the Authie, normal assay.*

Minéraux	Distance réticulaire (Å)
Kaolinite Chlorite Smectite Illite	7 Å ; 3,58 Å 14 Å ; 7 Å ; 3,54 Å 14 Å ; 15 A ; 17 Å 10 Å ; 5 Å

Une préparation des échantillons est réalisée au préalable au laboratoire (broyage, décarbonatation, défloculation, extraction de la fraction 2 µm, centrifugation, orientation sur lame de verre).

Pour obtenir une analyse diffractométrique complète d'un échantillon, trois lames ayant subi différents traitements sont nécessaires :

- lame « normale » : séchage
- lame « chauffée » : chauffage à 490 °C pendant 2 h
- lame « glycolée » : gonflement sous vapeur d'éthylène-glycol

Les trois diffractogrammes obtenus par échantillon (Figure 2.8B) nous permettent de déterminer la nature des minéraux argileux et d'effectuer une analyse semi-quantitative de ceux-ci.

2.2.3. RHEOLOGIE

La rigidité initiale du sédiment est mesurée à l'aide d'un viscosimètre coaxial FANN de type 35SR12. Le cylindre extérieur est le rotor (vitesse de rotation variant entre 0,9 et 600 tours.min^{-1}) ; le cylindre intérieur (appelé « bob ») est relié à un ressort et le sédiment à étudier comble l'espace libre entre les deux cylindres. Le principe de la mesure est l'établissement d'une relation contrainte-déformation de l'échantillon, en mesurant l'angle de rotation du ressort sous différentes vitesses de rotor croissantes. Un rhéogramme est établi à partir des résultats de cette expérience (Figure 2.9).

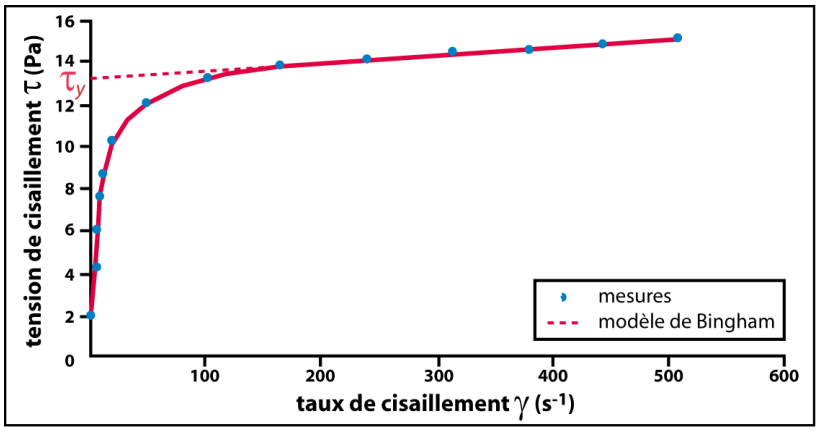


Figure 2.9. Exemple de rhéogramme (cas théorique) (d'après Lesourd, 2000).

Figure 2.9. *Example of rheogram (theoretical case) (from Lesourd, 2000).*

Le calcul des **taux de cisaillement (γ)** et **tension de cisaillement (τ)** se fait à partir de la formule suivante :

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{K_1 K_2 \theta}{K_3 N} \quad \textbf{(8)}$$

avec η : viscosité dynamique en poise (10^{-1}.Pa.s)
et τ : tension de cisaillement en dynes.cm^{-2} (10^{-1} Pa)
γ : taux de cisaillement (s^{-1})
θ : angle lu sur l'instrument
N : la vitesse angulaire du rotor (tr.min^{-1})
K_1 : constante de torsion du ressort
K_2 : constante de cisaillement du « bob »
K_3 : constante de cisaillement du rotor
(lors des mesures : K_1 =388 dynes.cm.degré$^{-1}$; K_2 =0,01323 cm^{-3}; K_3 = 1,7023 s^{-1}.tours^{-1}.mn^{-2})

Puis, à partir du modèle de Bingham, on définit la **rigidité initiale** τ_y (Pa ou N.m^{-2}) obtenue par interpolation sur l'axe des ordonnées de la partie rectiligne du rhéogramme et la **rigidité absolue** η (Pa.s) déterminée par la pente de cette droite (Figure 2.9).

2.3. ACQUISITIONS HYDRODYNAMIQUES

2.3.1. INSTRUMENTATION

Différents types de courantomètres et de houlographes ont été utilisés pendant ces travaux selon les objectifs. Les données météorologiques horaires de la station MétéoFrance du Hourdel en baie de Somme ont été mises à notre disposition pendant toutes les périodes d'acquisitions mais les données tri-horaires de la station de Berck hébergées par WindGuru leur ont été souvent préférées en raison de la proximité des sites d'études.

2.3.1.1. S4 *ADW* (INTEROCEAN SYSTEMS)

Il s'agit d'un courantomètre électromagnétique (Figure 2.10B) qui possède un capteur de pression (modèle *ADW*) permettant ainsi de mesurer également les variations du niveau libre d'eau liées à la marée et à la houle. Il fonctionne selon le principe suivant : la masse d'eau en mouvement traverse un champ magnétique généré à partir du capteur créant ainsi

une force électromotrice proportionnelle à la vitesse du courant et perpendiculaire à la fois au champ magnétique et à la direction du courant. Cette tension est mesurée par deux paires d'électrodes se situant de part et d'autre de l'appareil en position équatoriale (Figure 2.10B).

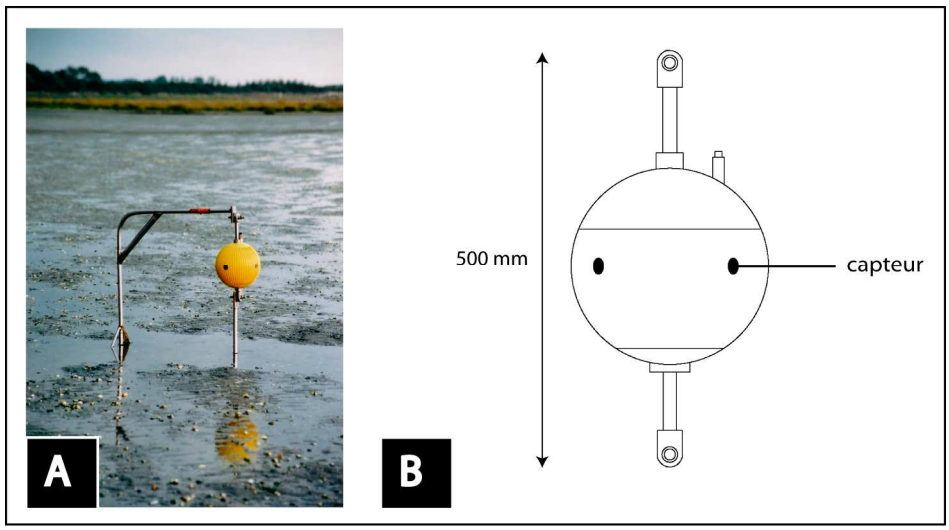


Figure 2.10. S4 *ADW*
A. S4 déployé à l'extérieur de la vasière principale ; **B.** Schéma de l'instrument.

Figure 2.10. *S4 ADW*
A. *S4 deployment in the external part of the main mudflat;* ***B.*** *Instrument diagram.*

La fréquence d'acquisition est de 2 Hz et la durée d'enregistrement (appelée « burst ») est de 9 minutes toutes les 15 minutes afin d'appréhender la houle. Le S4 a été déployé à proximité du chenal principal de l'estuaire de l'Authie ou à des emplacements où le forçage hydrodynamique est important en raison de sa structure de maintien (Figure 10A) capable de résister à une forte agitation. La mesure est généralement effectuée à 40 cm du substrat et par mesure de précaution, les enregistrements sont considérés comme cohérents une fois que la hauteur d'eau atteint 1m.

2.3.1.2. Workhorse Sentinel ADCP 1200KHz (RDIntruments)

ADCP est l'acronyme pour Acoustic Doppler Current Profiler. Le fonctionnement de cet instrument est basé sur la propagation d'ondes acoustiques et leur réflexion sur les particules en suspension dans l'eau.

Le transducteur (Figure 2.11B) émet une suite de trains d'onde de fréquence 1200 KHz appelé « ping » qui constitue un code. L'écho qui lui revient est dû à la réflexion

de l'onde émise par des particules en suspension dans l'eau. Si un courant est présent, la fréquence reçue par les particules est affectée d'un décalage, appelé effet Doppler. Le signal de retour est affecté à nouveau d'un même décalage.

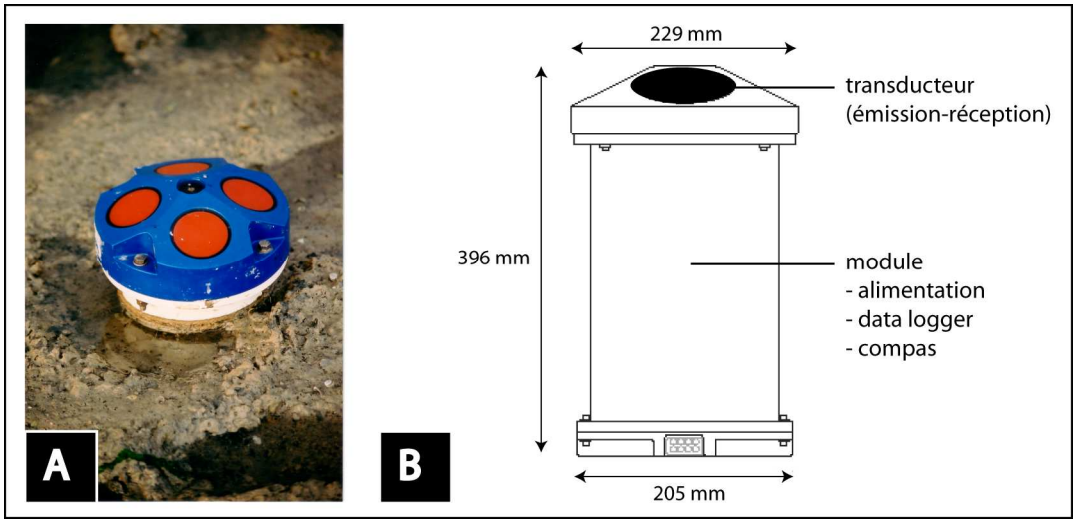


Figure 2.11. ADCP
A. ADCP déployé à l'extérieur de la vasière principale ; **B.** Schéma de l'instrument.

Figure 2.11. *ADCP*
A. *ADCP deployment in the external part of the main mudflat;* ***B.*** *Instrument diagram.*

La méthode d'auto-covariance compare le signal reçu au code émis pour déterminer les différences d'amplitude (liées à la profondeur) et les différences de fréquence (liées à la vitesse). L'ADCP permet donc d'obtenir les vitesses et les directions d'écoulement dans différentes couches (« bins ») de la masse d'eau selon les trois composantes du système ENU (East-Nord-Up).

Les données obtenues sont des moyennes réalisées sur de nombreux échantillons. Travaillant sur de faibles niveaux d'eau, nous avons pu faire des cellules de 10 cm avec une fréquence d'acquisition de 2 Hz pour un enregistrement de 9 minutes tous les quart d'heure. L'ADCP a été utilisé avant tout pour ces qualités d'explorateur vertical du champ de vitesse de courant mais il a permis également des mesures de la houle. L'ADCP a été installé dans le sédiment, laissant seulement apparaître les transducteurs à la surface (Figure 11A). Nous l'avons simplement lesté en profondeur par des poids pour les endroits cohésifs et entouré de trois pieux enfoncés pour les surfaces sableuses. Il a été utilisé seul dans le chenal principal de l'Authie en embouchure et en amont (Pont à Cailloux) afin de distinguer verticalement les masses d'eau entrantes et sortantes. Il a été déployé en addition d'ADV afin de compléter le

profil d'acquisition courantométrique sur des stations soumises à une faible agitation : zone pionnière, chenal secondaire.

2.3.1.3. Vector ADV 6MHz (NORTEK AS)

L'ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) est un courantomètre acoustique à effet Doppler. Le principe de mesure est donc le même que celui de l'ADCP à la différence que l'ADV possède un transducteur bi-statique à 6Mhz pour l'émission du train d'onde acoustisque (permettant une fréquence d'acquisition maximale de vitesse de 64 Hz) et que l'écho retourné par les particules est enregistré au niveau de trois capteurs (Figure 2.12B).

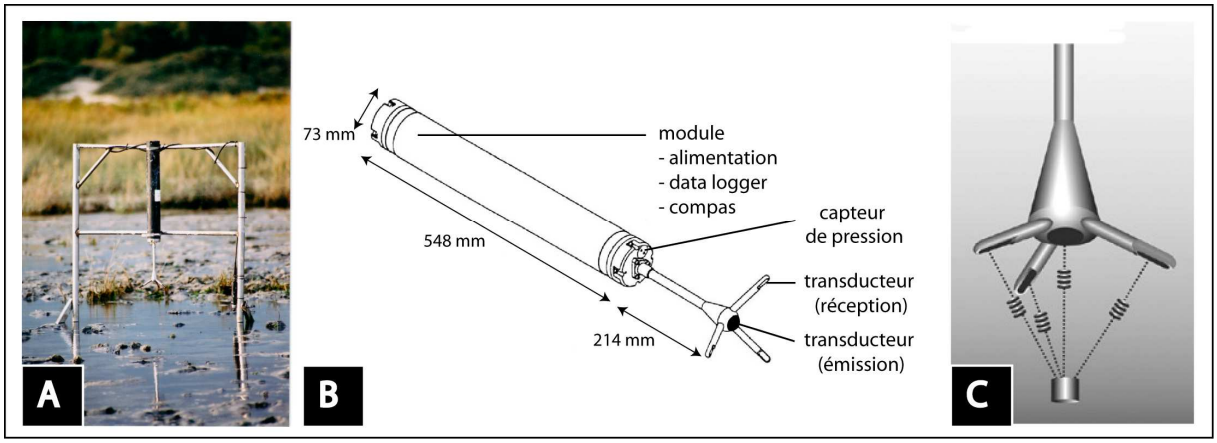


Figure 2.12. ADV
A. ADV déployé près de la zone pionnière dans la vasière principale ; **B.** Schéma de l'instrument ; **C.** Détail des transducteurs d'émission et de réception et de la cellule de mesure.

Figure 2.12. *ADV*
A. *ADV deployment near the pioneer zone in the main mudflat;* ***B.*** *Instrument diagram;* ***C.*** *Details of emitting and receipting transducers and of measurement cell.*

L'ADV possède une cellule fixe de mesure de 0,8 cm^3 (Figure 2.12C) qui enregistre la vitesse et la direction des courants suivant le système ENU. La structure qui le supporte a été conçue (GéoDAL, ULCO) de manière à réaliser des enregistrements au plus près de la surface des vasières et des marais (5 à 10 cm) (Figure 2.12A). La cellule de mesure est éloignée de la sonde afin de réduire les perturbations.

Il a été déployé à 1 Hz en acquisition simultané avec l'ASM, à 2 Hz en « soutien » de l'ADCP pour compléter le profil de courant et à 64 Hz pour envisager des mesures de la

turbulence. En fonction de la cadence d'acquisition, ses capacités de mémoire et de batterie rendent son utilisation confortable seulement pour de courtes périodes.
L'ADV dispose d'une interface (entrée/sortie) qui a permis son utilisation synchronisée sur le terrain avec un OBS mais également en pilotage direct par ordinateur (connectique RS232) en canal à eau (East Anglia University) lors de la calibration du ESST (donnée suivant le système XYZ).

2.3.2. PARAMETRES DE LA MAREE

Les valeurs de marée théoriques en estuaire de l'Authie ont été calculées par le logiciel Predit du SHOM pour la station de Berck. Les niveaux moyens de marée obtenus à l'aide des valeurs des constantes harmoniques sont référencés en altitude dans le référentiel IGN69 et sont reportés dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3. Niveaux moyens des marées (SHOM).
Table 2.3. *Mean levels of tides (SHOM).*

Niveau marin	**PMVEE**	**PMVE**	**PMME**	**NM**	**BMME**	**BMVE**
Altitude (mIGN69)	5,55	4,85	3	0,52	-2	-3,70

PMVEE : Pleine Mer de Vive-Eau Exceptionnelle ; **PMVE** (MHWS) : Pleine Mer de Vive-Eau ; **PMME** (MHWN) : Pleine Mer de Morte-Eau ; **NM** (MSL) : Niveau moyen ; **BMME** (MLWN) : Basse Mer de Morte-Eau ; **BMVE** (MLWS) : Basse Mer de Vive-Eau

Les valeurs des enregistrements sont données dans le système géographique (ENU). Le courant moyen Vm et la direction ont pu ainsi être déterminés à partir de ces paramètres. Pour mieux comprendre et vérifier l'importance relative des courants de marée, les vitesses Est et Nord ont été projetées sur des axes parallèles et perpendiculaires au trait de côte donnant les vitesses longitudinales et transversales associées (Figure 2.13).

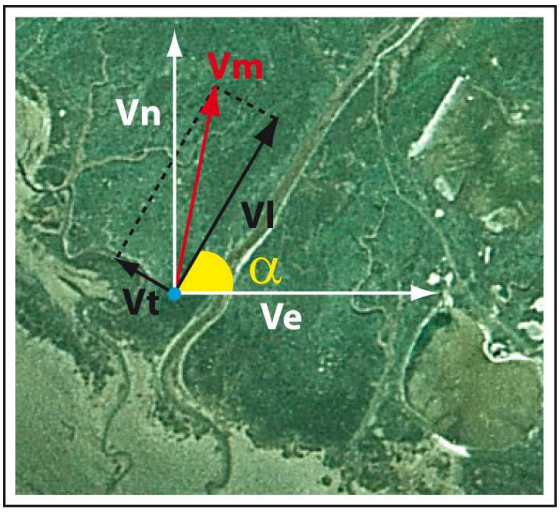


Figure 2.13. Exemple de décomposition de courant sur un chenal de marée : le vecteur de courant moyen (Vm) est décomposé en vitesses transversales (Vt) et longitudinales (Vl).

Figure 2.13. *Example of current decomposition on a tidal channel: the mean current vector (Vm) is decomposed into cross-shore (Vt) and longshore (Vl) currents.*

Ces vitesses prennent des valeurs négatives et positives. La valeur absolue de chaque composante correspond à la vitesse du courant et le signe correspond à sa direction. Le Tableau 2.4 propose un récapitulatif des directions possibles selon la position géographique de l'enregistrement.

Tableau 2.4. Interprétation simplifiée des directions des courants en fonction de la position des enregistrements.

Tableau 2.4. *Simplified interpretation of current directions as a function of the measurement position.*

	POSITION		
DIRECTION	**Embouchure**	**Estuaire Interne**	**Chenal de marée**
Vl > 0	vers la Canche	vers l'amont	vers la tête
Vl < 0	vers la Somme	vers l'aval	vers le chenal principal
Vt > 0	vers la côte	vers la dune	vers le schorre
Vt < 0	vers le large	vers le chenal principal	vers le chenal de marée

2.3.3. PARAMETRES DE LA HOULE

La houle est décrite dans ce travail grâce aux paramètres suivants : sa hauteur significative (Hs) en mètre, sa période pic (Tp) en seconde et sa direction en degré. Ces paramètres ont pu être obtenus par le logiciel Wave pour le S4 et Waveview pour l'ADCP qui effectuent cette opération par transformées de Fourier à partir des données issues du capteur de pression.

2.3.4. HOMOGENEITE DES DONNEES

Pendant ces travaux nous avons été amenés à utiliser plusieurs types de courantomètres et ce selon différents types de déploiement (radiales longitudinales, transversales, stations). Ceci nous amène à nous interroger sur l'homogénéité des résultats et la possibilité ou non de comparer les signaux de même fréquence mais issus d'appareils ayant des modes d'acquisition différents.

Les corrélations obtenues lors d'une comparaison préalable des données issues d'un ADCP (1er bin) et d'un S4 ADW (Figure 2.14) nous ont permis raisonnablement de considérer les enregistrements de manière similaire.

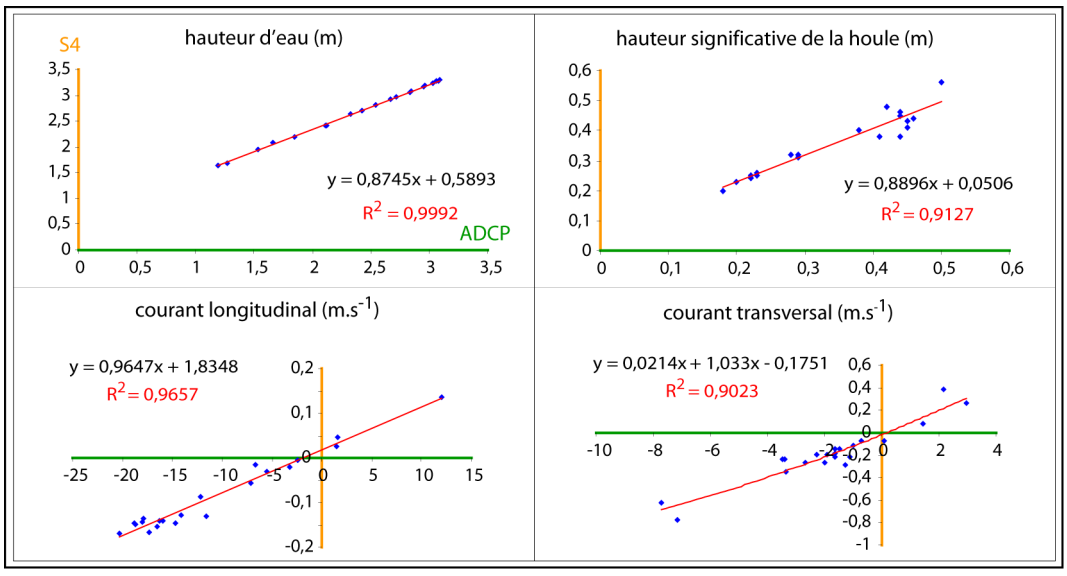


Figure 2.14 Corrélations des mesures entre un ADCP (abscisses) et un S4ADW (ordonnées) obtenues lors d'un co-déploiement en baie de Wissant (Sedrati, 2006).

Figure 2.14 *Correlations between an ADCP (abscissa) and an S4ADW (ordinates) measurement obtained during a co-deployment in Wissant bay (Sedrati, 2006).*

En revanche, la comparaison entre ADCP et ADV nous a permis ultérieurement de comparer seulement les hauteurs d'eau, les corrélations obtenues pour la houle n'étant malheureusement pas suffisantes (inférieures à 0,9) et l'acquisition courantométrique réalisée par l'ADV étant en dessous du seuil de mesure pour l'ADCP.

2.4. HYDROLOGIE, CARACTERISATION ET QUANTIFICATION DES MES

2.4.1. ECHANTILLONNAGE ET HYDROLOGIE

Afin de comparer les données existantes d'Authie avec celles d'autres systèmes estuariens, des acquisitions d'échantillons d'eau par pompage ont été menées sur trois sites expérimentaux : le chenal principal de l'Authie au lieu dit La Madelon et à Pont à Cailloux et un chenal secondaire important à proximité de la vasière principale de l'estuaire. Une étude temporelle des quantités de sédiment en suspension ayant déjà été effectuée sur le premier site lors de campagnes mensuelles par le laboratoire de Chimie Analytique et Marine (USTL), nous avons voulu poursuivre ce travail en élargissant à deux autres sites et ce à différents coefficients de marées, déterminant l'importance de l'intrusion d'eau salée et des masses d'eau en jeu comme agents dynamiques.

Le comportement hydrologique de l'Authie étant considéré comme "mixte" par les conclusions des précédentes études (Dobroniak, 2000 ; CNEXO, 1982), nous avons choisi de placer des stations de pompages à trois niveaux fixes avec parfois des niveaux complémentaires sur les côtés (Figure 2.15B). Ceci permet d'identifier une éventuelle stratification saline sur le premier mètre de la colonne d'eau qui n'aurait pas été décelée par les stratégies de prélèvement antécédentes à cause des hauteurs de prélèvement et du site choisis (Figure 2.15A). La zone plus salée, sur le fond par sa densité, pourrait être susceptible de concentrer les éléments fins et d'augmenter la charge de fond avant de les disperser. Cette information pourrait ensuite étayer la problématique liée aux sources de ces matériaux fins (origine marine, fluviale ou remaniement des surfaces envasées) et à la quantification de leur apports respectifs. La salinité des prélèvements issus de ces pompages a été mesurée systématiquement aux cours des différentes campagnes à l'aide d'un salinomètre.

L'hydrométrie, c'est-à-dire la mesure des hauteurs d'eau et débits, a une importance pour les apports continentaux de sédiments et même si l'Authie ne présente pas de débits très élevés, cette composante est à prendre en compte notamment en interaction avec les marées.

Ce rapport peut également être à l'origine d'une ségrégation mécanique des matériaux fins qui faciliterait leur transport et leur disponibilité pour le dépôt. Nous avons ainsi profité de la grande banque de données hydrométriques du réseau de stations de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie.

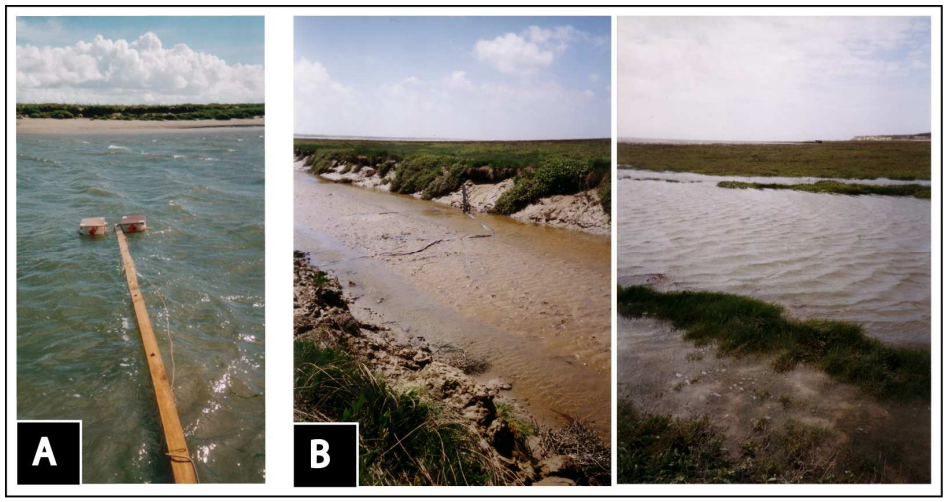


Figure 2.15. Systèmes de pompages utilisés pour les prélèvements d'eau
A. Station de pompage sur deux niveaux à la Madelon : perche libre avec flotteur échantillonnant à 10 cm de profondeur, un deuxième tuyau restant fixé par un lest à 10 cm du fond (CAM, USTL) ;
B. Station de pompage sur trois niveaux fixes dans un chenal de marée (GéoDAL, ULCO) avant et pendant la marée.

Figure 2.15. *Pumping systems used for water sampling*
A. *Pumping station with two levels at la Madelon: free pole with float sampling at 10 cm from surface, a second pipe is fixed at 10 cm above the bed (CAM, USTL) ;*
B. *Pumping station with three fixed levels in a tidal channel (GéoDAL, ULCO) before and during the tidal rise.*

2.4.2. QUANTIFICATION ET CARACTERISATION DES MES

2.4.2.1. Quantification par pesée

Les échantillons d'eau prélevés sont analysés par filtration à l'aide d'une membrane pré-pesée en acétate de cellulose de porosité 0,45 µm, limite arbitraire de qualification du compartiment dissous, et de 47 mm de diamètre disposé sur un support relié à une pompe à vide afin de faciliter l'écoulement. La vitesse de filtration dépend de la charge en MES mais surtout de la nature des MES (argile, sable, matière organique...) qui colmatent plus ou moins rapidement la membrane. Après la filtration, les filtres sont rincés à l'eau milli-Q (MILLIPORE, système Gradient Plus), une eau ultra pure d'une résistivité de 18,2 MΩ.cm^{-1}

pour éliminer les sels solubles, puis séchés en étuve à 60 °C pendant 12 h et pesés afin de pouvoir déterminer la masse de MES. Ce poids une fois estimé est rapporté au volume d'échantillon filtré et la concentration de MES en $mg.l^{-1}$ calculée.

2.4.2.2. Acquisitions optiques : OBS et ASM-IV

L'Authie étant un estuaire soumis à des apports silteux voire sableux importants, les méthodes traditionnelles par pesée ne permettent pas de prendre en compte de façon satisfaisante les apports d'éléments fins comme les particules vaseuses, négligeables en masse. D'autres outils ont donc été déployés : il s'agit d'une instrumentation de type acoustique et optique qui peut nous permettre de quantifier indirectement les quantités de sédiments en suspension par une analyse du signal rétrodiffusé. L'instrumentation acoustique restant extrêmement difficile à calibrer pour ce type d'application, nous avons préféré nous concentrer sur les mesures optiques du fait de leur sensibilité à la présence des éléments fins qui réalisent une obscuration importante.

L'Argus Surface Meter IV (ASM-IV) ARGUS est un système optique qui permet une appréciation des mouvements du substrat grâce à un réseau d'OBS (Optical Backscatter Sensor) espacé de 1cm sur une longueur de 96 cm (Figure 2.16A et B). Il s'agit d'un instrument créé initialement pour le suivi à haute résolution de l'élévation du substrat avec une application majeure dans la gestion portuaire des draguages. Après émission d'un faisceau infra rouge, un OBS mesure la lumière réfléchie par la masse d'eau et les particules en suspension. Opérant au départ par simple discrimination entre lit de sédiment et la colonne d'eau, le développement d'une technique de calibration a donc été nécessaire pour augmenter la sensibilité de l'instrument afin de détecter la réflectivité des particules à des concentrations plus faibles. Ce travail a montré de premiers résultats encourageants notamment par comparaison avec des échantillons *in situ* obtenus par pompage et par LISST (Gilpin, 2003) et a rapidement confirmé le potentiel de l'ASM-IV à travailler comme un multi-capteur OBS (Marion *et al*., 2004).

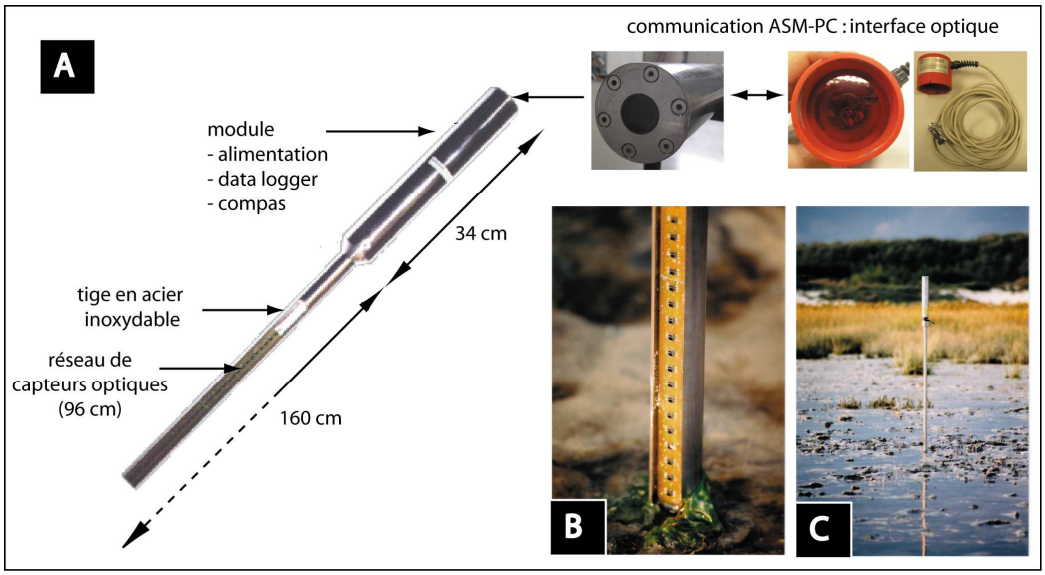


Figure 2.16. ASM-IV
A. Schéma de l'instrument ; **B.** Zoom sur le réseau de capteurs optiques ;
C. ASM-IV déployé sur la partie supérieure de la vasière principale de l'Authie.

Figure 2.16. *ASM-IV*
A. *Instrument diagram;* ***B.*** *Zoom of the optical sensor network;*
C. *ASM-IV deployed near the pioneer zone in the Authie main mudflat.*

Le but de la calibration est d'établir les gammes minima et maxima de réponse des capteurs pour correspondre au plus haut/bas voltage de sortie (exprimé en décompte de réflectivité pour l'ASM IV) attendu sur le terrain à partir de l'OBS avec les caractéristiques d'alimentation du data logger de l'instrument. Si le gain n'est pas correctement ajusté, les résultats subiront l'un des deux effets indésirables suivants. Quand le gain est trop élevé des données peuvent êtres perdues car la sortie des capteurs est limitée par l'alimentation et sera saturée avant que des pics en concentration en sédiment soient atteints. Si le gain est trop bas, la résolution possible des résultats ne sera pas utilisée.

Pour établir la gamme minimum de réponse, l'instrument est installé dans une cuve de calibration (Figure 2.17A) avec de l'eau claire puis activé. Le réseau de capteurs entier doit être immergé et aucun matériel réfléchissant ne doit être présent à une distance minimale de 10 cm des capteurs. Le décompte de réflectivité est alors enregistré à zéro. Pour établir la gamme maximale, l'eau est chargée de sédiment prélevé sur site jusqu'à atteindre la concentration maximale attendue lors de l'acquisition sur le terrain. Le décompte de réflectivité est alors enregistré et automatiquement ajusté au gain maximum de l'instrument.

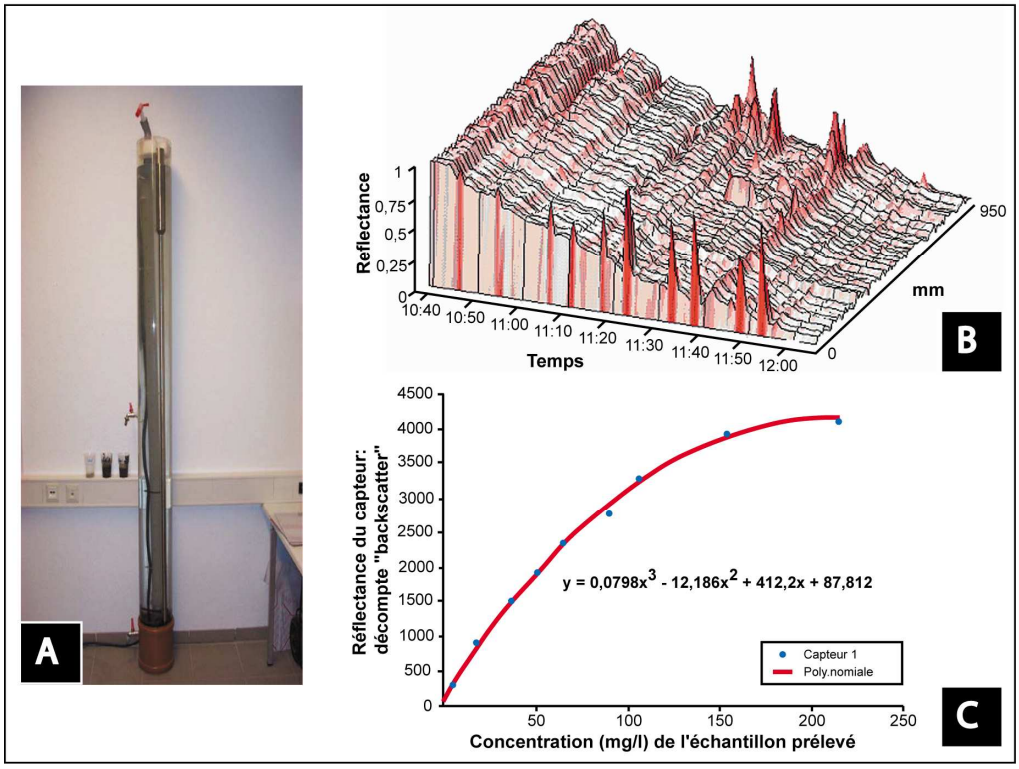


Figure 2.17. Calibration de l'ASM-IV
A. Cuve de calibration (Greenwich University) ; **B.** Série de calibration : chaque réduction de la réflectance correspond à une dilution de la charge en sédiment de l'eau circulant dans la cuve ;
C. Droite de régression polynomiale obtenue pour un capteur optique.

Figure 2.17. *ASM-IV calibration*
A. *Calibration tank (Greenwich University);* ***B.*** *Calibration series: each reflectivity reduction corresponds to a diminution of sediment load in the circulating water of the tank;*
C. *Polynomial regression curve obtained for one optical sensor.*

Une courbe d'étalonnage est ensuite établie en diluant la charge sédimentaire à dix concentrations différentes couvrant la gamme du maximum au minimum (Figure 2.17B). A chaque étape de dilution, un échantillon est prélevé pour une analyse massique de la concentration afin de fournir une comparaison avec le décompte de réflectivité. Ces données sont ensuite regroupées sur un graphique qui permet d'établir une courbe de régression polynomiale qui servira ultérieurement à convertir les résultats bruts obtenus en concentration (Figure 2.17C).

A haute fréquence d'échantillonnage (10 s d'enregistrement espacé par 5 s de pause), les données enregistrées fournissent des instantanés de profils de concentration en matière en suspension pendant 3 à 4 marées. L'intérêt de cet appareil est également sa grande autonomie en batterie qui permet d'envisager des acquisitions plus longues sans téléchargement nécessaire mais ceci à une fréquence d'acquisition plus faible. En interpolant les résultats par

kriegeage grâce au logiciel Surfer GOLDEN SOFTWARE nous avons pu représenter simplement ces instantanés sous forme de carte en fonction du temps (Figure 2.18).

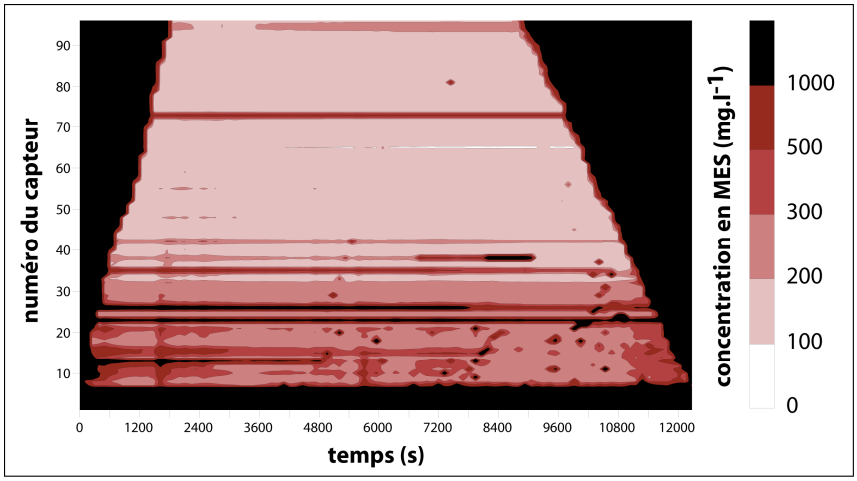


Figure 2.18. Exemple de résultats obtenus avec l'ASM-IV : « instantanés » du transport sédimentaire durant une marée après conversion en concentration de MES (les aires noires de part et d'autre correspondant à des hauteurs où les capteurs sont hors de l'eau, celle en dessous au niveau du lit sédimentaire).

Figure 2.18. *Example of results obtained with the ASM-IV: « snapshots » of sediment transport during one tide after conversion into SPM concentration (black areas at the right and left corresponding to levels where sensors are uncovered by water, the one above to le level of sediment bed).*

En association avec un courantomètre, le calcul de flux de sédiment est rendu possible. Un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) qui peut fournir des données hydrodynamiques à différents niveaux permet d'apprécier les variations verticales de ces flux notamment.

2.4.2.3. Granulométrie *in situ*

Une quantification complémentaire a pu nous être apporté par le déploiement d'un LISST-25X (Laser In Situ Scattering Transmittometer) SEQUOIA SCIENTIFIC (Figure 2.19A) prêté par ASICON BV qui permet de calculer une concentration volumique totale et dans deux sous groupes de taille. En effet, le LISST-25X peut discriminer les particules de 2,5 à 500 µm et de 63 à 500 µm grâce à deux plages de mesure programmables.

L'instrument fonctionne sur la diffraction par les particules en suspension d'un faisceau de lumière de 670 nm de longueur d'onde (lumière rouge) émis par une diode et utilise la théorie de Mie tout comme le granulomètre laser utilisé pour les échantillons de

sédiment. Comme pour toute mesure de diffractométrie, il est nécessaire d'établir une mesure de fond avec de l'eau claire. L'instrument est ensuite déployé selon un plan horizontal afin d'éviter le dépôt de particules sur la cellule de mesure pendant la période d'acquisition (Figure 2.19C).

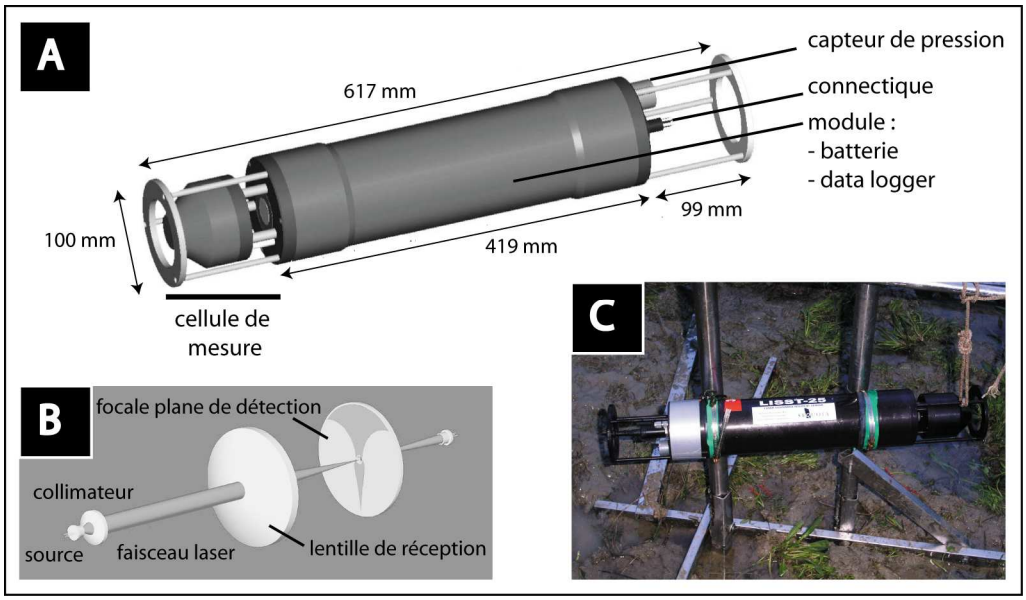


Figure 2.19. LISST-25X
A. Schéma de l'instrument ; **B.** Détail du fonctionnement de la cellule de mesure ; **C.** Déploiement sur le terrain.

Figure 2.19. *LISST-25X*
A. *Instrument diagram;* ***B.*** *Detail of cell measurement;* ***C.*** *Fieldwork deployment.*

Un second détecteur mesure la concentration surfacique. Le «Sauter Mean Diameter» ou SMD est défini par le rapport entre la concentration volumique V et la concentration surfacique A, soit pour des particules sphériques le rapport 1,5/A. Ce terme issu de la recherche en aérodynamique prend une signification intéressante dans notre domaine car ce rapport a une incidence sur l'interprétation de l'atténuation de la lumière. L'instrument possède la fonction de transmissomètre (données exprimées en % de transmission optique) qui rend la comparaison avec des données historiques (issues d'équipements plus anciens) possibles. Il intègre également un capteur de pression d'une précision de 7 cm.

Les particules fines se présentant le plus souvent sous la forme de complexes (flocs) avec d'autres éléments, surtout organiques, rend la définition granulométrique *sensu stricto* non satisfaisante *in situ* quand elles sont en suspension. Le laser travaillant en termes de volume est incapable de distinguer les flocs et les particules grossières par exemple. Ces mesures restent cependant influencées par de nombreux paramètres tels que la luminosité, la

couleur ou la forme des particules. Il nous a donc fallu envisager un descripteur complémentaire qui serait à même de faire la discrimination entre les particules de nature vaseuse et sableuse.

2.4.2.3. Dosage des métaux et des éléments particulaires

Nous nous sommes intéressés à la composition métallique des particules composant les MES (ainsi qu'à la teneur des éléments majeurs présents dans le compartiment dissous) : Ca, K, Mg, Sr, SO_4, Al et Zr. L'intérêt de telles mesures est double, réaliser de meilleures calibrations des signaux de nos appareils, faciliter l'interprétation des données existantes mais surtout acquérir une donnée originale et primordiale pour le projet en cours. Les échantillons ont été doublés pour permettre des analyses conjointes des filtrats par GéoDAL et CAM. Afin de déterminer les proportions des minéraux majeurs, nous avons choisi de sélectionner trois marqueurs géochimiques. Les carbonates sont tracés par la calcite (Billon, 2001). L'aluminium (les aluminosilicates) qui compose 10% des argiles permettra de les tracer. Pour les sables (SiO_2), nous n'avons pas pu utiliser directement le silicium comme traceur car il forme des composés volatiles avec l'acide fluorhydrique lors des attaques nécessaires. Nous avons donc choisi le zirconium lui aussi présent dans les silicates pour suppléer à cet élément.

Le conditionnement du matériel est une étape cruciale dans la chaîne analytique lorsque l'on s'intéresse à l'étude des métaux présents à l'état de traces. En effet, l'utilisation d'un matériau inadapté et/ou un lavage des flacons trop modéré ou trop fort peuvent conduire à des résultats inexploitables. L'ensemble du matériel de prélèvement et de filtration utilisé est en polypropylène et polyéthylène. Les différents flacons et petits matériels sont tout d'abord immergés au moins 24 heures dans une solution diluée d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique pour désorber les éventuels métaux présents sur les parois. Le matériel est ensuite rincé abondamment à l'eau Milli Q, puis séché sous hotte à flux laminaire pour éviter au maximum les apports de poussière. Enfin il est stocké dans des sacs en plastique scellés. Pour les flacons, quelques millilitres d'eau Milli Q sont introduits afin d'éviter le séchage interne des parois. Ils sont également stockés dans des sacs plastiques qui ne sont ouverts qu'au moment du prélèvement. Le matériau utilisé pour les godets d'attaque des filtres est du Téflon (PTFE) car il a la propriété d'être inerte à la plupart des acides et peut être chauffé jusqu'à environ 300 °C. Les godets en Téflon sont remplis avec un mélange d'acide

chlorhydrique et d'acide nitrique (2:1) et chauffés pendant 4 heures. Ils sont ensuite rincés à l'eau Milli Q puis séchés comme précédemment.

Une étape de filtration est nécessaire pour séparer les particules. Elle est réalisée sur des membranes de porosité 0,45 µm en acétate de cellulose. Elles seront ensuite minéralisées afin de déterminer les teneurs en métaux dans les particules par ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy), tandis que le filtrat sera conservé dans des flacons de 20 ml après acidification par 100 µl d'acide nitrique pour que tous les éléments présents restent en solution.

La détermination des métaux dans un échantillon solide nécessite au préalable son passage en phase liquide. Dans le cas des sédiments, il est courant de réaliser une série d'extractions séquentielles dont le protocole a été initialement mis au point par Tessier *et al.* (1978) mais en raison du peu de matériel particulaire présent sur les filtres, seules des attaques totales ont été envisagées sur une soixantaine d'échantillons. L'attaque totale du sédiment a été réalisée à partir du protocole proposé par Ouddane (1990). La procédure de minéralisation appliquée à nos échantillons se fait de la façon suivante :

- Introduction des membranes après filtration dans les godets en téflon

- Ajout de 5 mL d'acide nitrique (HNO3) suprapur à 65 % puis chauffage à 100°C pendant quatre heures (destruction du filtre)

- Ajout de 10 mL d'acide fluorhydrique à 40 % puis chauffage à 140°C pendant quatre heures (décomposition des silicates comme SiO2, des argiles et des carbonates principalement la calcite CaCO3).

- Après évaporation quasi-totale sous hotte, ajout d'un mélange d'acide nitrique suprapur et d'acide chlorhydrique suprapur, puis chauffage à 120°C jusqu'à disparition du solide (destruction des oxydes, des sulfures réfractaires et des matières organiques). Nous évaporons comme précédemment l'excès d'acide.

- Ajout de 10 mL d'eau milli Q et de 1 ml d'acide nitrique (solubilisation des métaux absorbés sur la paroi). Cette dernière étape dure environ deux heures à une température de 100°C.

La technique d'analyse par ICP-AES permet de déterminer la concentration des éléments présents dans cette solution. L'appareil utilisé au CAM est le modèle Vista-Pro VARIAN ; il se compose d'un système d'introduction de l'échantillon, d'une source d'excitation, d'un système optique et d'un système de détection. Pour l'analyse, on réalise une gamme d'étalonnage suivant les concentrations que l'on pense obtenir. Il faut ensuite programmer

l'appareil afin de sélectionner les différents éléments à analyser par l'intermédiaire de certaines longueurs d'onde.

Pour les analyses des éléments particulaires tels que le COP (Carbone Organique Particulaire) et NOP (Azote Organique Particulaire), les échantillons sont immédiatement congelés après prélèvement pour éviter toute évolution biologique du contenu. La filtration est ensuite réalisée sur une membrane pré-pesée en fibre de verre WHATMAN GF/F de porosité 0,7 µm et de 25 mm de diamètre. Les filtres sont ensuite séchés à l'étuve (60°C pendant 12h) puis calcinés au four (400-450°C pendant 12 h) pour évaluer la teneur en matière organique. Une dessiccation avec vapeurs d'acide chlorhydrique pendant 24 h puis un séchage à l'étuve à 80°C permet de quantifier la teneur en carbone inorganique. Finalement, le dosage grâce à un analyseur élémentaire CHNS de type LECO 932 détermine la teneur en COP et NOP.

2.4.3. SUIVI DU TRANSPORT DE MES.

Le « Booner tube » ou ESST (Estuarine Suspended Sediment Trap) est un piège à sédiment qui capture les particules en suspension par un système d'ouverture disposé à environ 40 cm du substrat (Figure 2.20A et B). Développé par l'Université de Sussex (Charman, 2004), ce dispositif permet d'obtenir une série continue des sédiments tranportés par la masse d'eau (Figure 2.20A).

Les sédiments piégés dans un cylindre central sont relevés aux marées de mortes-eaux suivant chaque cycle tidal semi-lunaire. La masse sèche, la teneur en matière organique et la granulométrie peuvent être aisément déterminée.

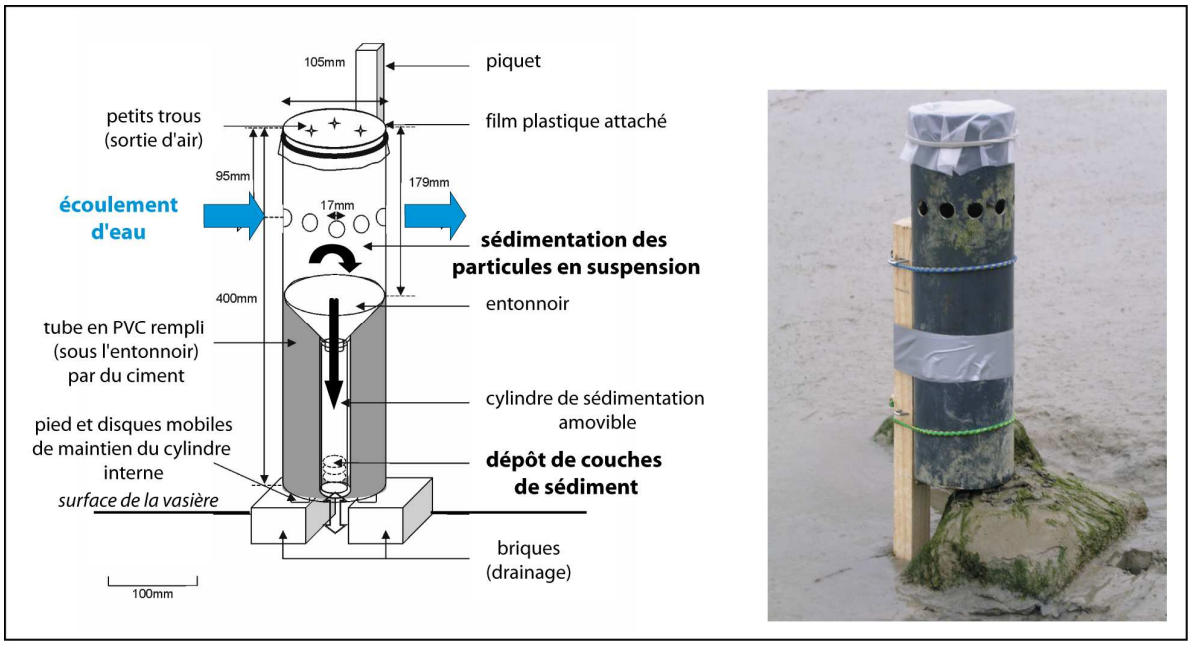


Figure 2.20. ESST
A. Schéma du piège à sédiment et principe de fonctionnement (adapté de Charman, 2004) ;
B. Installation sur site (la Madelon).

Figure 2.20. *ESST*
A. *Sediment trap diagram and functioning principle (from Charman, 2004);*
B. *Field deployment (la Madelon).*

La signature de chaque marée peut être parfois enregistrée à travers des laminations chronologiques. Les différences en couleur et en épaisseur des lamines semblent pouvoir être reliées à la nature et à la granulométrie du sédiment dues à des variations dans la capacité de transport sédimentaire de l'écoulement (à travers des fluctuations de vitesse de courant notamment) pendant une marée et sur le cycle tidal complet (Figure 2.21).

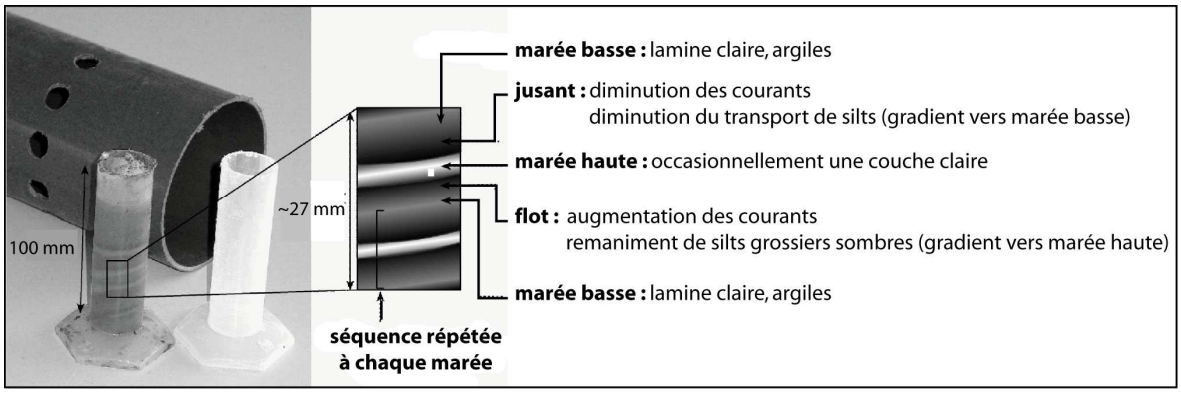


Figure 2.21. Exemple de résultats : sédiments déposés dans le cylindre central après un cycle tidal où de nombreuses laminations peuvent être observées (adapté de Charman, 2004).

Figure 2.21. *Example of results: deposited sediment in the central cylinder after a tidal cycle where numerous laminations can be observed (from Charman, 2004).*

Des efforts de calibration ont également été nécessaires pour le calcul de flux sédimentaire, exprimé en $g.m^3.s^{-1}$. Des expérimentations en canal à eau (University of East Anglia) ont été menées conjointement avec la Sussex University et ont permis le développement d'équations qui, appliquées à la masse de sédiment collectée par heure d'inondation, permettent une estimation du flux sédimentaire moyenné sur la période de déploiement.

Ce système nous a permis des comparaisons avec nos partenaires du programme INTERREG III RIMEW avec l'estuaire de l'Ouse pour le suivi annuel et avec celui de la Medway sur des mesures ponctuelles. Il nous a permis également d'améliorer nos techniques de quantification du transport sédimentaire.

2.5. QUANTIFICATION DE LA SEDIMENTATION

2.5.1. APPORTS

Afin de quantifier les apports sédimentaires sur les marais, un système de porte-filtres développé par l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes a été choisi (Figure 2.22B). Il s'agit d'un support fixé à même le sol où viennent se clipser deux filtres. Le filtre inférieur permet de faciliter le drainage de l'eau et le filtre supérieur collecte les sédiments (Figure 2.22A). Ce dernier est relevé après chaque cycle semi-lunaire de marée, séché (60°C pendant 48 h) et pesé. Les résultats sont exprimés en $kg.m^{-2}$ relatif à la surface de collecte du filtre (75,43 cm^2) et peuvent être ultérieurement reliées à la période d'inondation ($kg.m^{-2}.h^{-1}$ d'inondation).

Ce dispositif a déjà été employé pour ce genre de quantification en baie du Mont Saint Michel, ce qui nous permettra d'envisager des comparaisons inter-sites. Du fait de la turbulence engendrée par le support lui-même, ce système ne peut être utilisé que sur des substrats végétalisés (Figure 2.22C). Différentes initiatives ont été menées afin de réaliser un système comparable pour l'étude des apports sur substrats meubles mais se sont malheureusement révélées infructueuses à cause de l'hydrodynamisme important et de la bioturbation. Afin d'évaluer de façon plus complète l'erreur réalisée sur la mesure, une expérience complémentaire a été menée. Elle a consisté à prendre en compte les resuspensions éventuelles de sédiment en utilisant deux filtres par station, l'un étant collecté après chaque marée (Figure 2.22D).

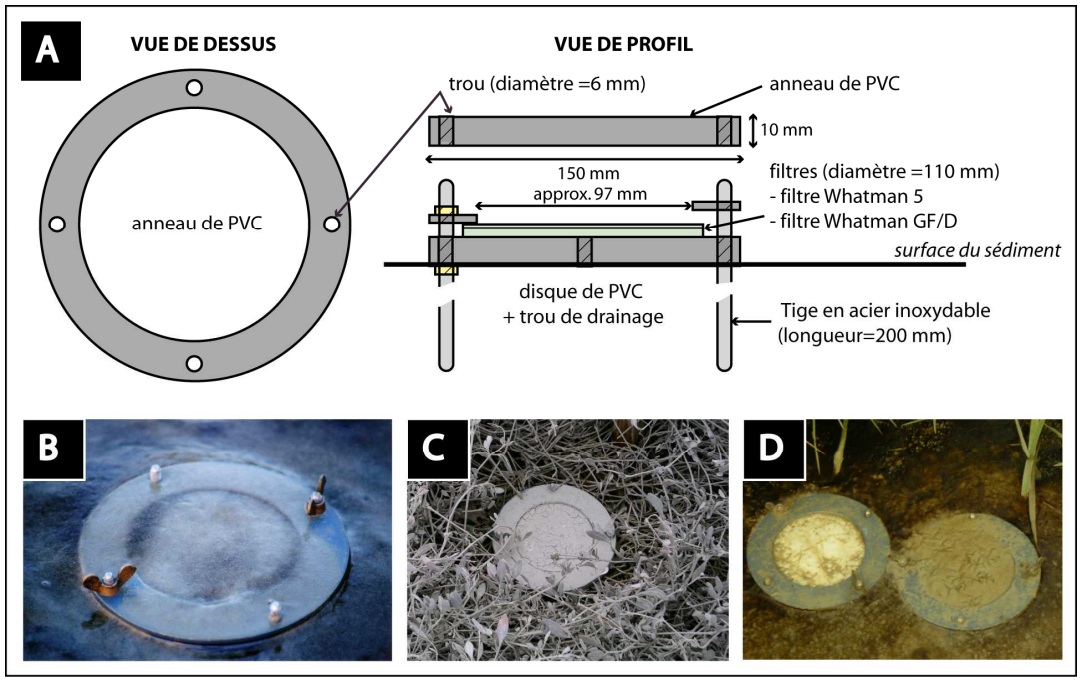


Figure 2.22. Porte-filtres
A. Schéma du système (d'après Jigorel, 1996) ; **B.** Station dans la zone pionnière à Spartine;
C. Station dans un schorre à Obione ; **D.** Station avec deux systèmes comparant les apports par marée et par cycle semi-lunaire.

Figure 2.22. *Filter racks*
A. *Filter rack diagram (from Jigorel, 1996);* ***B.*** *Station in Spartina pioneer zone;*
C. *Station in a Halimonium portucolaides salt marsh;* ***D.*** *Station with two racks to compare the inputs over each tide and over a semi-lunar cycle.*

2.5.2. ACCRETION

L'Altus (MICREL SA) est un altimètre immergeable qui fonctionne comme un échosondeur avec une fréquence d'émission acoustique de 2 MHz. Ce système comporte un module comprenant une batterie, une mémoire et un capteur de pression qui sera en partie logé dans le sédiment et un transducteur fixé sur le haut d'une structure adaptée développée par l'IFREMER, peu perturbante du milieu étudié (Figure 2.23A et C). Les données sont téléchargées grâce une interface de lecture reliant l'altimètre et l'ordinateur. La résolution de l'appareil est de 0,06 cm avec une précision de ± 0,2 cm.

Lors de son immersion, ce système mesure le temps entre l'émission de l'onde acoustique par l'échosondeur et la réception de l'écho renvoyé par la surface du sédiment. Ce temps de trajet est transformé en distance suivant la vitesse du son dans l'eau. Le niveau maximum du signal acoustique reçu par le transducteur, par rapport au signal émis, est également enregistré et appelé « *écho max.* » pour cet appareil.

Lors de l'installation de l'Altus, le transducteur a été placé à une hauteur de 20 cm environ de la surface (surface de la mesure de 3,14 mm^2) afin de minimiser la perte de signal et d'obtenir un maximum de mesures (Figure 2.23B). La fréquence d'acquisition choisie est d'une mesure toutes les dix minutes de manière à suivre les processus à l'échelle semi-diurne Dans cette configuration, la capacité mémoire est de 2 à 3 mois, l'autonomie de la batterie est de 3 ans.

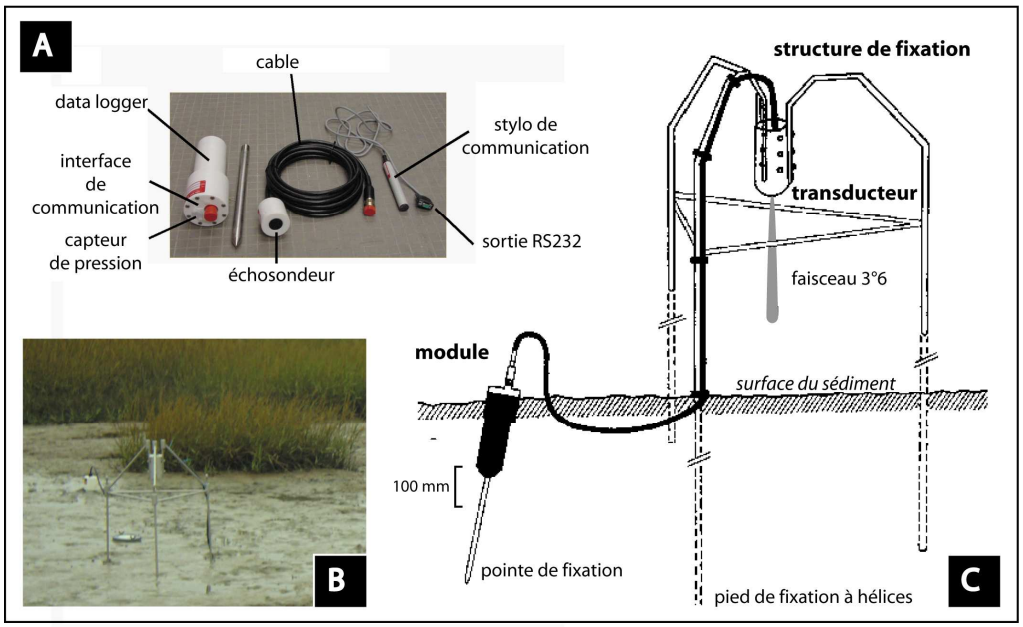


Figure 2.23. Altimètre
A. Détail des composant de l'Altus (Deloffre, 2005) ;
B. Altus sur site ; **C.** Schéma du déploiement (Ifremer).

Figure 2.23. *Altimeter*
A. *Detail of Altus components (Deloffre, 2005);*
B. *Altus field deployment;* ***C.*** *Deployment diagram (Ifremer).*

2.5.3. ELEVATION

Le SET ou Sedimentation-Erosion Table a été employé par divers auteurs (Schott et De Jong, 1982, Boumans et Day, 1993 ; Jigorel, 1996). Ce système a ensuite été amélioré vers une meilleure représentation statistique des données et rebaptisé Sedimentation-Elevation Table (Cahoon *et al*., 2002a) puis RSET (Rod Sedimentation-Elevation Table) (Cahoon *et al*., 2002b) car la nouvelle structure ne permettait plus d'envisager l'accrétion mais l'élévation grâce à une tige centrale plus profonde.

Le RSET (Rod Surface-Elevation Table) est un système peu intrusif pour mesurer précisément les changements d'élévation du substrat sur de longues périodes (Cahoon *et al*.,

2002b). Ce dispositif mécanique de suivi de la sédimentation fabriqué d'après plan (Figure 2.24) sur financement de la FR 1818 est le premier en France.

Le point de référence central est une tige d'acier inoxydable de 15 mm de diamètre compose de sections de 1,2 m qui sont enfoncées successivement dans le substrat jusqu'au refus. Une partie de cette tige dépasse de la surface pour permettre la fixation du dispositif de mesure. Une fois fixé, le RSET fournit une référence plane et constante depuis laquelle la distance à la surface du sédiment est mesurée grâce à des tiges ajustées au niveau du substrat (Figure 2.24).

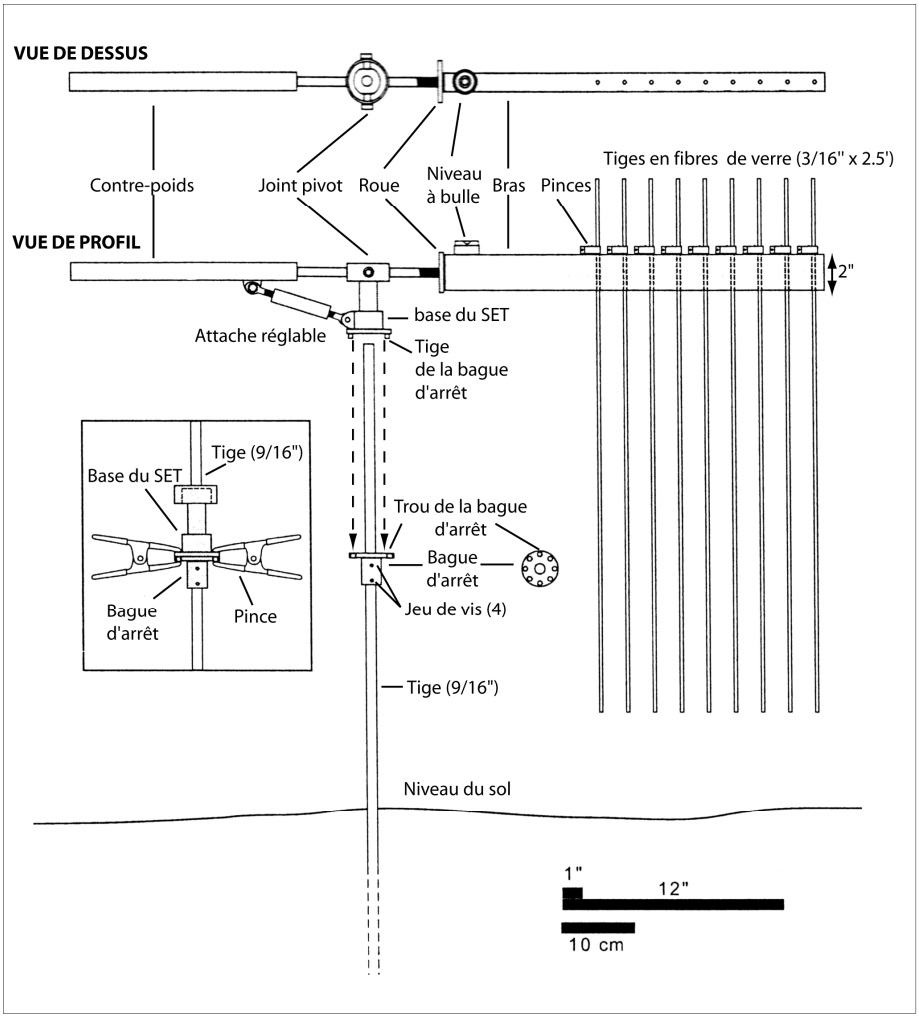


Figure 2.24. Schéma du RSET (Rod Sedimentation-Elevation Table) (d'après Cahoon *et al*., 2002).

Figure 2.24. *RSET diagram (Rod Sedimentation-Elevation Table) (from Cahoon et al., 2002).*

2.6. AGENCEMENT DES CORPS SEDIMENTAIRES ET DATATION

2.6.1. STRATIGRAPHIE

2.6.1.1. Sondages

Des carottes courtes de sédiment (entre 4 et 5 m) ont été obtenues à l'aide d'un vibro-carottier développé au laboratoire PBDS (Figure 2.25). Il a été modifié dans le cadre du CPER pour l'alléger et améliorer sa pénétration afin de lui donner la mobilité nécessaire à des études en terrain accidenté comme ceux rencontré en Authie. Il est composé d'une échelle matée reposant sur un socle et maintenue par deux jambes de force. Un marteau piqueur, servant de système à percussion, est monté sur un chariot qui glisse librement le long de l'échelle, accompagnant ainsi la descente du tube lors du carottage.

Les tubes utilisés, d'un diamètre de 7,6 cm, sont en aluminium et sont équipés d'une ogive tranchante afin de pénétrer plus aisément dans les sédiments, d'une peau d'orange à la base pour retenir les sédiments lors de l'extraction de la carotte, d'un piston à l'intérieur qui atténue les déformations dans le sédiment et améliore sa retenue et d'une pièce spéciale au sommet qui reçoit le pilon du marteau piqueur.

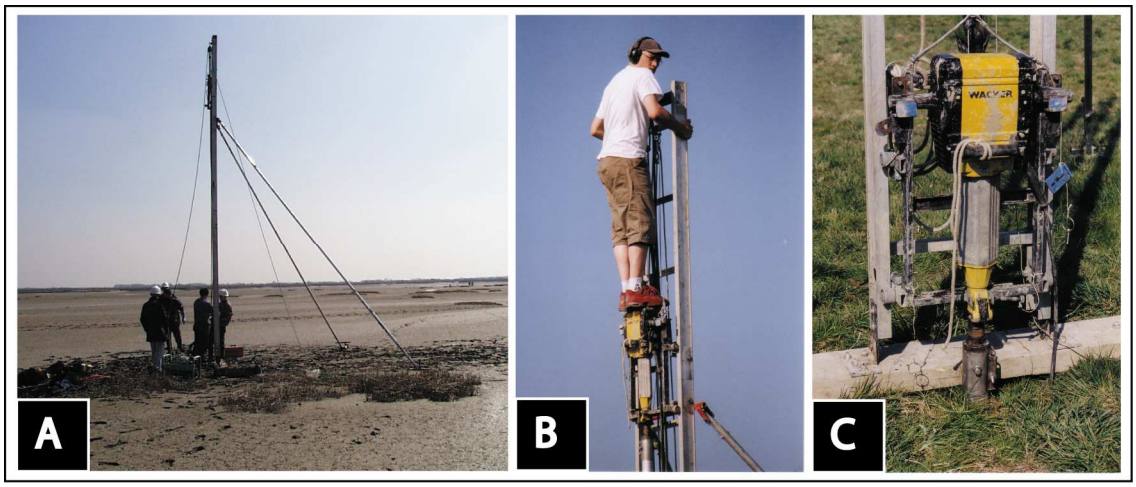


Figure 2.25. Vibro-carottage
A. Installation de l'échelle supportant le marteau piqueur (rive Nord) ; **B.** Les tubes en aluminium sont enfoncés mécaniquement dans le sol ; **C.** La carotte est réalisée, il faut maintenant l'extraire.

Figure 2.25. *Vibro-coring*
A. *Installation of the ladder supporting the vibro-corer (northern bank);* ***B.*** *Aluminium tubes are driven mechanically into the ground;* ***C.*** *The core waiting to be extracted.*

Un total de 34 carottes a été prélevé par cette technique au cours de différentes campagnes s'étalant de mars 2002 à novembre 2005 (annexe II-2). Un sondage supplémentaire, profond de 16 m, a été réalisé par le BRGM. Enfin, quelques dizaines de sondages ont été réalisés à la tarière afin de compléter l'analyse spatiale.

2.6.1.2. Lithologie et description des faciès

Les carottes sont sectionnées sur le terrain en tronçons de 1,50 m environ afin de faciliter leur transport et ensuite ouvertes de retour au laboratoire dans le sens de la longueur. Une fois photographiée pour archivage, une moitié de la carotte est dédiée à l'analyse des caractéristiques du sédiment et à la description des faciès. L'autre moitié est archivée.

2.6.1.3. Radiographie

La technique d'analyse d'image SCOPIX (Laboratoire EPOC, Université de Bordeaux I) a également été utilisée pour compléter la description de trois carottes présentant de nombreuses tidalites. Il s'agit d'une méthode non destructive qui, en soulignant de faibles variations de densité, permet une observation détaillée des faciès et de la structure interne des dépôts.

La chaîne d'acquisition comporte un équipement Rayons X ISOVOLT 160 KV, une chaîne de radioscopie Haute Définition (amplificateur de brillance - caméra - moniteur) et une plate-forme informatique (Figure 2.26A). L'échantillon est déplacé latéralement sur un chariot motorisé; il est ensuite récupéré par un ensemble de radioscopie et l'image est améliorée en scopie en temps réel avant d'être enregistrée sous format numérique (Figure 2.26B).



Figure 2.26. Radioscopie (web EPOC)
A. Banc de radioscopie (SCOPIX) ; **B.** Exemple de résultat.

Figure 2.26. *Radioscopy (web EPOC)*
A. *Radioscopy bench (SCOPIX);* ***B.*** *Example of result.*

L'observation d'une section longitudinale de la carotte par rayons X permet une bonne distinction des différentes couches de dépôt. Le cliché obtenu traduit les différences de densité des sédiments par des niveaux de gris et des lits sédimentaires millimétriques peuvent ainsi être détectés (Migeon *et al*., 1999 ; Lofi et Weber, 2001). De nombreux phénomènes naturels présentent une évolution cyclique traduite par l'oscillation plus ou moins complexe des signaux étudiés. Dans le but de mieux cerner le processus de sédimentation, les divers cycles influençant le dépôt peuvent être mis évidence en en décomposant le signal donné en niveau de gris, par transformée de Fourier. Les résultats obtenus dans des environnements similaires semblent concluants (Balouin, 1998 ; Teissier, 1997).

2.6.2. APPORTS DE LA GEOPHYSIQUE

La connaissance de la dimension verticale est ce qui est le plus difficile d'accès dans ce type d'environnement. Elle est pourtant indispensable si l'on veut connaître l'histoire récente du comblement de l'estuaire. L'interprétation des documents cartographiques anciens donne une première estimation, les carottages également mais ces derniers ne donnent que des informations ponctuelles difficiles à corréler. Il est nécessaire d'étudier la géométrie des corps sédimentaires reconnus au travers des carottes. Pour cela, des missions de sismique à très haute résolution et de prospection par géoradar ont été entreprises par les deux laboratoires GéODAL et PBDS.

2.6.2.1. Sismique très haute résolution

Il s'agit d'un système acoustique dont les ondes sont émises à très haute fréquence (2,5 kHz) permettant ainsi de pénétrer les sédiments. Ces ondes acoustiques sont réfléchies à chaque changement de couche sédimentaire, appelé réflecteur, que ce soit en granulométrie ou en inclinaison. La profondeur est une fonction du temps mis entre l'émission du signal et la réception de l'écho retourné, exprimé en temps double. L'émission et la réception de ce signal sont effectuées par un « poisson » relié par un câble à deux unités qui permettent son alimentation, la gestion de la mesure et le stockage des données (Figure 2.27).

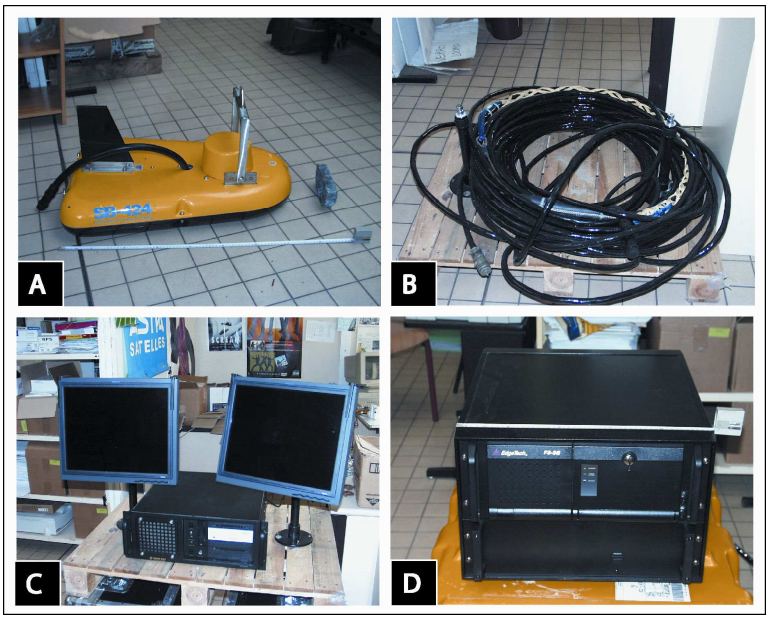


Figure 2.27. Sismique très haute résolution
A. « Poisson » émetteur-récepteur ; **B.** Câble de connection et de traction ; **C.** Unité PC et écrans de contrôle ; **D.** Deuxième unité PC (pont entre le PC principal et le poisson, comprends les accumulateurs nécessaires à l'alimentation du « poisson »).

Figure 2.27. *Very high resolution seismic system*
A. *Emitting-receiving "fish"; **B.** Cable of connection and traction; **C.** PC unit and control screens; **D.** Second PC unit (bridge between the principal PC unit and the "fish", comprising energy source for the "fish").*

Un premier essai a été mené en mai 2003 révélant toute la difficulté d'appliquer ce genre de technique à un estuaire tel que l'Authie présentant de petits fonds, un chenal navigable étroit et un fort hydrodynamisme. Nous avons utilisé le système sur un petit bateau rigide de pêche côtière (Figure 2.28A), de 5 m de long approximativement, présentant un faible tirant d'eau. Le « poisson » a été fixé en position d'acquisition sur un bras articulé (Figure 2.28B), les petits fonds ne nous autorisant pas l'utilisation du câble pour sa traction.

Nous avons ensuite profité d'un plan d'eau important lors d'une marée haute de vive-eau d'équinoxe pour assurer une meilleure navigation.



Figure 2.28. Equipement en place
A. Installation de l'unité de pilotage dans un petit bateau de pêche côtière (Centre nautique des Sternes) ;
B. Bras articulé positionnant le « poisson ».

Figure 2.28. *In situ equipment*
A. *Installation of the running unit in a small fishing boat (Centre nautique des Sternes);*
B. *Articulated arm positioning the « fish ».*

Neuf lignes sismiques ont été réalisées (Annexe II-3). Elles ne présentent malheureusement pas les orientations initialement souhaitées en raison des difficultés de navigation rencontrées le jour de la mission. Chaque profil a été observé minutieusement afin de répertorier les principaux réflecteurs composant la structure interne du sédiment. Puis les relations spatiales entre les différents profils lithologiques obtenus avec les nombreux sondages et les profils sismiques ont été corrélées pour proposer un schéma général du prisme sédimentaire de l'estuaire.

2.6.2.2. Géoradar

Utilisée depuis les années 90 en archéologie ou en génie civil, la prospection géoradar de surface ou GPR (Ground-Probing Radar ou Ground Penetrating Radar) est, dans son principe, proche de la méthode de réflexion sismique. En effet, c'est une méthode géophysique fondée sur l'analyse de la propagation, de la diffraction et de la réflexion des ondes électromagnétiques haute fréquence (de 10 MHz à 1 GHz). Elle est aujourd'hui largement utilisée pour l'étude de la sub-surface. L'antenne radar est déplacée à vitesse constante le long de la surface à ausculter et les ondes réfléchies sont captées par le récepteur et transformées via l'unité centrale en image continue. La profondeur d'investigation dépend

de l'atténuation du milieu et de la fréquence utilisée ; elle varie de 2 à 50 m (Bano, 2000). La pénétration du signal est cependant limitée dans les milieux argileux ou salins ou saturés en eau. Les ondes électromagnétiques ne pénètrent pas aussi profondément que les ondes acoustiques mais donnent une mesure de plus haute résolution.

Des profils ont été auscultés par G-Co SARL à l'aide d'un radar SIR 2000 (Subsurface Interface Radar) GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS Inc. en utilisant une antenne traîneau émettant un signal de 400 MHz (Figure 2.29A) de longueur d'onde permettant de détecter les structures sédimentaires sur environ 2 m de profondeur à raison de sept balayages par seconde, la durée d'écoute étant de 60 ns. Au total, 1430 m de linéaire ont été parcourus avec cette technique. L'objectif principal de cette campagne de mesure était de reconnaître des paléochenaux de l'Authie repérés sur des photographies aériennes et aujourd'hui localisés dans des zones poldérisées. Des images en coupe du sous-sol sont ainsi obtenues (Figure 2.29B). Les sédiments denses, homogènes et compacts apparaissent en couleurs claires et les sédiments remaniés, les réflecteurs et les vides en couleurs sombres.

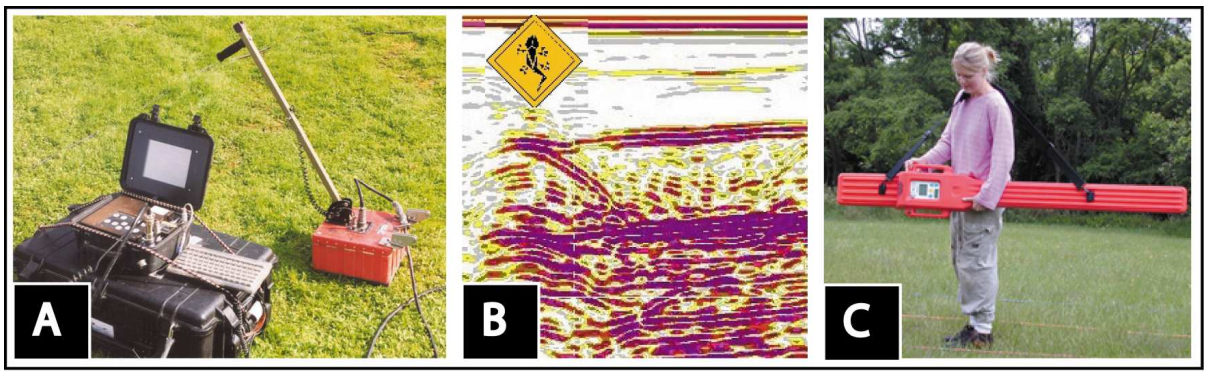


Figure 2.29. Géoradar et prospection électromagnétique
A. Dispositif de mesure, à gauche le SIR 3000 et à droite l'antenne 400MHz ; **B.** Exemple d'image obtenue par le géoradar (web G-co SARL); **C.** GEM 300 (web GSSI).

Figure 2.29. *Ground penetrating radar and electromagnetic prospecting*
A. *Measurement device, SIR 3000 on the left and 400MHz antenna on the right;* ***B.*** *Example of picture obtained with ground penetrating radar (web G-co SARL);* ***C.*** *GEM 300 (web GSSI).*

Une prospection a également été entreprise par G-Co SARL à l'aide d'un générateur de champs électromagnétiques à fréquences multiples, le GEM 300 GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS Inc. (Figure 2.29C) qui peut mesurer en émettant jusqu'à 16 fréquences différentes en simultané allant de 330 Hz à 19950 Hz (GSSI, 1998). Cette technique restitue une image en plan du sous sol ausculté représentant les conductivités apparentes exprimées en

$mS.m^{-1}$. Le signal obtenu est scindé en deux composantes : une composante en phase (partie réelle du signal) et une composante en quadrature de phase (partie imaginaire) qui permet d'identifier les objets et structures polarisables. Les fichiers obtenus permettent une représentation rapide des résultats grâce au logiciel Surfer GOLDEN SOFTWARE sous forme de cartes.

2.6.3. AGE DES HORIZONS SEDIMENTAIRES

2.6.3.1. Méthode cartographique

Sur les carottes, la limite la plus nette est celle correspondant au passage slikke/schorre. Nous avons voulu dater cette transition en utilisant des données cartographiques telles que des documents anciens ou des photographies aériennes) permettant de matérialiser en un point le passage slikke/schorre (Figure 2.30) (Curoy, 2002).

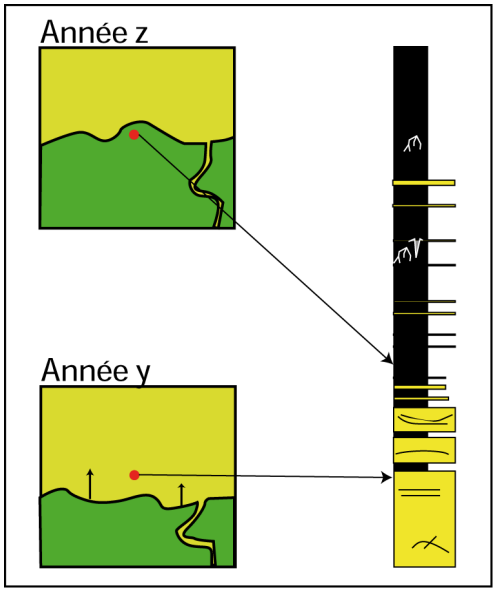


Figure 2.30. Méthodologie utilisée pour dater sur les carottes la transition slikke/schorre (Curoy, 2002).

Figure 2.30. *Method used for mudflat/salt marsh transition dating in cores (Curoy, 2002).*

Connaissant le point de prélèvement, l'ensemble des cartes et photographies aériennes sont observées, le but étant de trouver la plus ancienne montrant le point non végétalisé (slikke, datée de l'année X) et la plus récente avec le point végétalisé (schorre, datée de l'année Y). Le passage slikke/schorre s'est effectué entre l'année X et Y.

On peut ainsi dater l'âge de la transition sur la carotte et, ainsi, évaluer les taux de sédimentation. Bien que cette méthode simple ait montrée une fiabilité intéressante, il est toutefois nécessaire d'avoir une connaissance plus précise de l'âge des sédiments.

2.6.3.2. Datation isotopique

Un certain nombre de **r**adio-isotopes sont des marqueurs privilégiés pour la datation des sédiments. Nous en avons utilisé principalement les données de deux isotopes radiogéniques: le ^{137}Cs et le ^{210}Pb.

La désintégration de ces deux éléments est partiellement accompagnée d'une émission de rayonnements gamma d'énergie spécifiques à chaque noyau. La détection de ces ondes électromagnétiques très pénétrantes est réalisée à l'aide d'un spectromètre gamma (Figure 2.31A). Ces mesures ont été effectuées au laboratoire souterrain de Modane pour minimiser au maximum les interférences avec les rayonnements cosmiques (Reyss *et al.*, 1995) ainsi qu'au CER (Sussex University). La Figure 2.31B donne un exemple de spectre obtenu sur l'un de nos échantillons bruts.

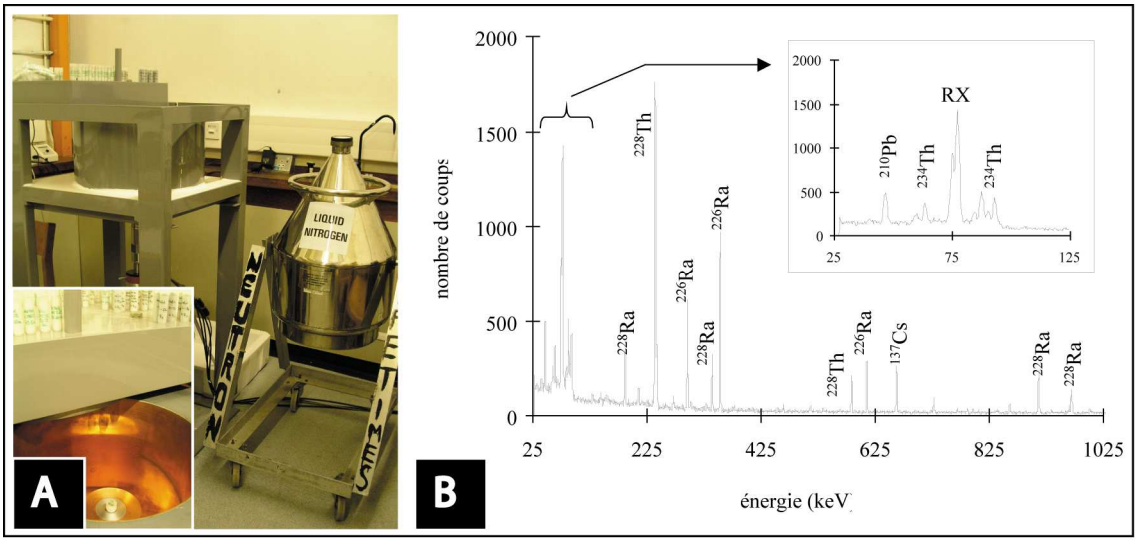


Figure 2.31. Spectrométrie gamma
A. Spectromètre et détail de la cuve (CER, Sussex University) ; **B.** Spectre gamma d'un échantillon de sédiment prélevé dans une carotte de l'estuaire de l'Authie (Billon, 2001).

Figure 2.31. *Gamma spectrometry*
A. *Spectrometer and detail of the tank (CER, Sussex University);* ***B.*** *Gamma spectra of a sediment sample from a core taken in the Authie estuary (Billon, 2001).*

- **Datation au ^{210}Pb**

Le ^{210}Pb est un isotope naturel formé comme un produit de désintégration de ^{238}U selon deux voies (Figure 2.32) et qui possède un temps de demi-vie de 22,3 années. La datation implique dans ce cas l'analyse de la désintégration exponentielle du contenu isotopique avec la profondeur.

La première voie forme la partie non supportée du contenu en ^{210}Pb (^{210}**Pb$_{xs}$**) selon la réaction suivante :

$$^{238}\text{U} \Rightarrow {}^{226}\text{Ra} \Rightarrow {}^{222}\text{Rn} \Rightarrow {}^{210}\text{Pb}$$

(croûte terrestre) (atmosphère)

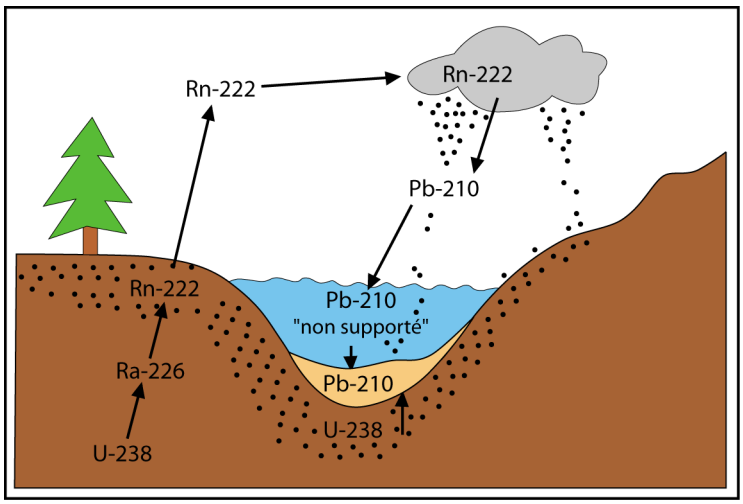


Figure 2.32. Cycles de formation du ^{210}Pb.

Figure 2.32. ^{210}Pb formation cycles.

Le ^{210}Pb$_{xs}$ rejoint par l'intermédiaire de précipitations la masse d'eau où son affinité forte avec les particules fines et la matière organique le lie avec les matières en suspension qui seront amenées à ce déposer.

Le ^{210}Pb est également formé sur le sédiment lui-même, incorporé à la fraction minérale : c'est l'activité supportée du contenu en ^{210}Pb, à savoir l'activité du ^{226}Ra, qui doit être soustraite du contenu total en ^{210}Pb avant des analyses plus poussées.

Connaissant les activités de ^{210}Pb et ^{226}Ra, il devient alors possible d'en déduire le temps écoulé depuis le dépôt des particules à la surface de la colonne sédimentaire selon la méthode dite de concentration initiale constante ou CIC qui applique l'équation suivante :

$$t_i = 1 / \lambda \ln (A_0 / A_i) \qquad \textbf{(9)}$$

t_i : différence d'âge entre les sédiments superficiels et prélevés à la profondeur i (en années)

λ : désintégration constante du ^{210}Pb (λ=0,03108 an^{-1})

A_0 : activité "non supportée" du ^{210}Pb à la surface du sédiment (dpm.g de Matière Sèche^{-1})

A_i : activité " non supportée" du ^{210}Pb à la profondeur i (dpm.g de Matière Sèche^{-1})

Connaissant la profondeur à laquelle le sédiment est prélevé, cette méthode permet de calculer les vitesses de sédimentation (exprimées en cm.an^{-1}) au sein de nos carottes sédimentaires.

- **Datation au ^{137}Cs**

Le ^{137}Cs est un isotope radioactif artificiel introduit dans l'environnement en 1952 avec le début des tests d'armes nucléaires. Un pic correspondant à la fin des essais atmosphériques est observé en 1963 et un autre correspondant à l'accident de Tchernobyl en 1986. Le ^{137}Cs issu des tests nucléaires est uniformément répartis alors que celui lié à l'accident de Chernobyl présente une distribution très morcelée, rendant impossible la datation dans certains sites. Après 1970, l'usine de Sellafield en Angleterre, sur la mer d'Irlande, représente une autre source de ^{137}Cs avec un pic vers 1974-1977 (Cundy *et al.*, 1997). La datation passe par reconnaissance de pic dans l'enregistrement sédimentaire dans ce cas. A partir des intensités des pics, un traitement mathématique permet d'obtenir l'activité de chacun des éléments.

2.7. ANALYSES SPATIALES

2.7.1. RECTIFICATION DE PHOTOGRAPHIES AERIENNES

De par l'échelle et la fréquence élevée des campagnes sur le territoire national depuis la fin de la Seconde Guerre Mondiale, la photographie aérienne reste l'outil le mieux adapté pour étudier l'évolution du trait de côte sur un demi-siècle. L'analyse de l'évolution de la ligne du rivage à partir de clichés aériens verticaux a été réalisée par de nombreux auteurs dont Smith et Zarillo (1989), Suanez et Simon (1997) et Durand (1998). Sur les littoraux du Nord-Pas de Calais ce travail a été effectué par Dobroniak (2000), Aernouts (2005) et Chaverot (2006).

Er-Mapper est un logiciel de traitement d'images qui permet de rectifier les photographies aériennes verticales. La rectification est un traitement informatique du cliché original qui consiste à géo-référencer et déformer ce dernier afin de limiter les différentes altérations de l'image inhérentes à la prise de vue et au développement (Thieler et Danforth, 1994), l'accumulation des différentes erreurs possibles pouvant engendrer une erreur totale de plusieurs dizaines de mètres entre la photographie et la réalité. La rectification polynomiale a été préférée à l'ortho-rectification *sensu stricto* en raison du manque d'informations techniques spécifiques (caractéristiques de la focale, altitude du vol…) pour les campagnes les plus anciennes.

Différentes campagnes de photographies de l'Institut Géographique Nationale (IGN) ont été retenues afin d'appréhender l'évolution spatiale du système estuarien de l'Authie (Annexe II-4). Un orthophotoplan réalisé par l'Espace Naturel Régional (ENR) du Nord-Pas-de-Calais à partir d'une campagne de 2000 nous a servi de référence. Grâce à celui-ci, les coordonnées en Lambert 1 de tous les pixels de l'image sont connues et correspondent à un mètre carré. Le travail a consisté à entrer sur la photographie à rectifier, préalablement scannée en haute résolution, les coordonnées d'un maximum de points, appelés amers, en latitude et en longitude. Les amers doivent être répartis de façon homogène et sont choisis pour leur constance temporelle. En Authie, l'anthropisation précoce des rivages sur les deux rives (digues des polders et urbanisation des stations balnéaires proches) a facilité cette tâche qui se révèle par ailleurs ardue sur le domaine côtier en général (Aernouts, 2005). Après rectification, les déformations ont été réduites et l'image géo-référencée.

L'erreur maximale possible s'élève à ± 19 m pour la comparaison entre deux dates du trait de côte. Elle comprend les marges d'erreurs associées à la délimitation du trait de côte sur les photographies aériennes rectifiées (± 9,5 m), à la précision de l'orthophotoplan (± 3 m), au repérage des amers sur la photographie aérienne (± 2 m), au repérage du trait de côte tel que mesuré au niveau des digues (± 3 m) et à l'erreur résiduelle calculée par le logiciel pour l'ensemble des amers (< ± 1,5 m). L'analyse de l'évolution entre deux dates rapprochées n'a donc d'intérêt que si le rivage progresse ou recule rapidement. Aussi, notre choix a été de choisir une campagne de photographies par décennie afin de réduire le plus possible les problèmes inhérents à la marge d'erreur. Les campagnes retenues sont celles de 1949, 1963, 1977, 1989 et 2000 en raison de l'espacement homogène des dates.

2.7.2. ANALYSES SOUS SIG

L'information géographique peut être définie comme l'ensemble de la description d'un objet et de sa position géographique à la surface de la Terre. Un SIG ou Système d'Information Géographique permet de gérer des données alphanumériques spatialement localisées, ainsi que les données graphiques permettant d'afficher ou d'imprimer plans et cartes. Ses usages couvrent les activités géomatiques de traitement et diffusion de l'information géographique. Il assure donc les cinq fonctions suivantes (parfois regroupées sous le terme des '5A') (Denègre et Salgé, 1996) :

- saisie des informations géographiques sous forme numérique (**Acquisition**),
- gestion de base de données (**Archivage**),
- manipulation et interrogation des données géographiques (**Analyse**),
- mise en forme et visualisation (**Affichage**),
- représentation du monde réel (**Abstraction**)

Le rôle du SIG est de proposer une représentation plus ou moins réaliste de l'environnement spatial (Figure 2.33A) en se basant sur des **primitives** graphiques telles que des points, des lignes et des polygones (format vecteur : ponctuel, linéaire, surfacique) ou des maillages (format raster : matriciel, ici l'image géoréférencée). À ces primitives sont associées des informations qualitatives (dans notre étude : station, trait de côte, schorre, réseau de chenaux). Les objets sont généralement organisés en couches regroupant des objets similaires (exemple : trait de cote en 1947).

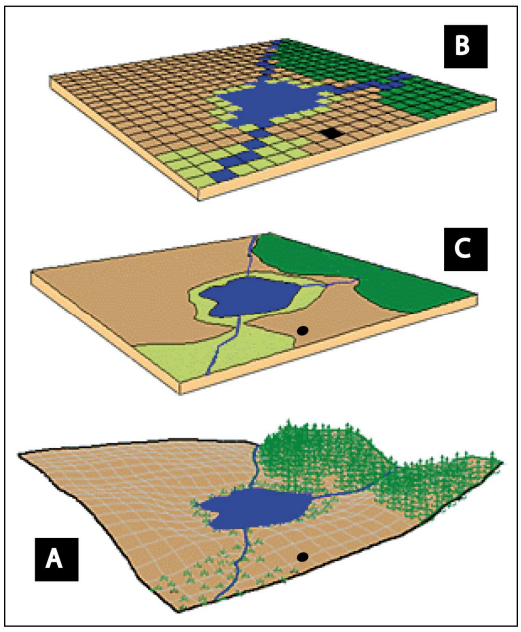


Figure 2.33. Type d'abstraction du monde réel par SIG (web ForumSIG)
A. Terrain géoréférencé ; **B.** Mode raster (image) : une valeur par pixel ; **C.** Mode vecteur (lignes, points).

Figure 2.33. *Real world abstraction type with SIG (web ForumSIG)*
A. *Georeferenced field ;* ***B.*** *Raster mode (image) : one value per pixel ;* ***C.*** *Vector mode (lines, points).*

Les évolutions respectives du trait de cote et de la limite du schorre ont déjà été réalisées par Dobroniak (2000) à partir de cartes anciennes et de photographies aériennes rectifiées. Dans nos travaux nous nous sommes particulièrement intéressés à la description et à l'analyse du réseau de chenaux de marée ainsi qu'à la quantification de la progression du schorre, et ce notamment en relation avec l'évolution des deux flèches sableuses. Pour cela, les chenaux de marée ont été digitalisés à partir de photographies aériennes puis la position de chaque chenal dans le réseau a été décrite suivant la classification de Strahler (1964), très largement utilisée pour la description des bassins hydrographiques.

Dans la classification de Strahler, tout drain qui n'a pas d'affluent se voit attribuer la valeur 1. Puis, le calcul de la valeur de chaque drain se fait selon la méthode suivante : un drain d'ordre n+1 est issu de la confluence de deux drains d'ordre n et un drain ne change pas d'ordre lorsqu'il est rejoint par un drain d'ordre inférieur au sien (Figure 2.34). L'ordre de Strahler d'un bassin versant, ou ici des sous parties de notre réseau de chenaux, correspond à l'ordre du drain principal à l'exutoire. La connaissance des ordres de Strahler des drains permet d'avoir des indices sur plusieurs de leurs caractéristiques comme la complexité du réseau et sa pente. Cette ordination a été effectuée sur l'ensemble du réseau.

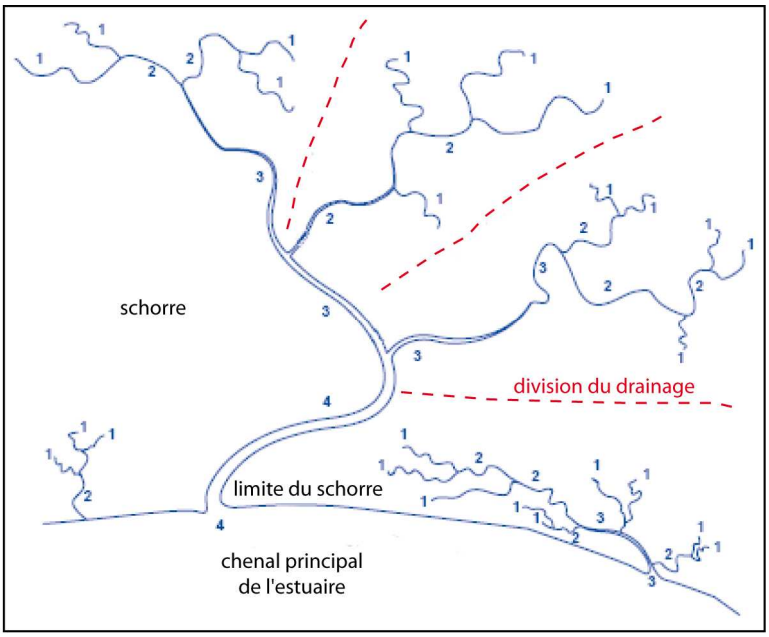


Figure 2.34. Réseau de chenaux sur un marais salé et ordination, selon Strahler (1964).

Figure 2.34. *Tidal channel network on a salt marsh and ordination, according to Strahler* (1964).

Une fois le réseau organisé, les sous réseaux de même ordre peuvent être analysés. Ce découpage en sous-ensembles permet d'avoir des objets comparables entre eux afin d'autoriser des études synchroniques et diachroniques. Plusieurs paramètres peuvent être ainsi calculés :

- le **coefficient de bifurcation (R_b)**

$$R_b = \lambda_u / \lambda_{u+1}$$

Il dépend directement du nombre de drain et de leur ordre dans un réseau donné et reflète l'organisation géométrique du réseau.

- la **longueur totale (L_t)** et la **longueur moyenne ($L_{m\lambda}$)** des drains d'un même ordre pour un réseau considéré ainsi que leur **pente moyenne (α_m)** si l'on dispose des informations d'élévation (MNT).

- la **sinuosité (S)** moyenne des drains pour un même ordre du bassin considéré

- l'**aire (A)** et le **périmètre (P)** du réseau

2.8. IMPLICATIONS ECOLOGIQUES

Au même titre que de nombreux espaces estuariens, les surfaces intertidales présentent un évident intérêt faunistique et floristique tant au niveau des ressources crées que des fonctions écologiques qu'elles englobent.

Dans ces travaux, les caractéristiques floristiques seront envisagées en tant que contrainte dans les aspects hydrosédimentaires locaux mais également en tant que témoins des niveaux moyens d'action des marées. Aucune étude phytosociologique pointue n'a été menée depuis 2000 mais pour chaque station étudiée, l'espèce la plus abondante a été déterminée ainsi que les communautés constituant les différentes ceintures de végétation.

La faune benthique sera quant à elle utilisée en tant qu'indicateur à moyen terme des qualités du sédiment (granulométrie, taux de matière organique...) à même de décrire des changements environnementaux sur une échelle pluri-annuelle. Les communautés benthiques ont fait l'objet de deux campagnes importantes en 2002 et 2005 ainsi que d'échantillonnages plus ponctuels. Cinq prélèvements sont réalisés à chaque station à l'aide d'un carottier de $1/40^{ème}$ de m^2. La faune est séparée du sédiment associé *in situ* par tamisage dans l'eau sur une maille carrée de 1 mm. Le refus de tamis contenant le macrozoobenthos est ensuite placé dans un sac plastique solide et étanche puis traité avec une solution de formol dilué à 4 % à laquelle on ajoute du rose bengal ou de la phloxine (qui se fixent aux protéines et colorent en rose le matériel biologique). Chaque échantillon est rincé sur un tamis de maille inférieure (afin d'éviter les émanations toxiques de formol et de récupérer tout le benthos initialement échantillonné) puis renversé dans une grande bassine avec environ deux centimètres d'eau. Le tri des animaux, facilité par leur coloration, se réalise par flottage (un léger courant d'eau met les individus les plus légers en suspension) et de façon manuelle (pour les animaux plus denses). Après avoir sommairement rassemblé la faune par groupe dans des piluliers, la détermination des espèces et le comptage des individus se fait sous loupe binoculaire, à l'aide d'ouvrages de taxonomie (Knight-Jones *et al.*, 1995; Hayard *et al.*, 1995).

CONCLUSION

La stratégie adoptée est celle d'une large pluridisciplinarité sans perdre de vue la nécessité de dégager une cohésion dans la méthode de travail et des résultats. Cette pluridisciplinarité est exigée par la complexité même des estuaires et des interactions entre processus. La méthodologie développée dans ce travail témoigne notamment de la volonté d'appréhender le comportement des particules fines dans notre site tout en soulignant les interactions caractéristiques de la dualité des mélanges sablo-vaseux dans un souci de compréhension de la dynamique sédimentaire globale.

Ce chapitre a été construit et argumenté de manière à rendre compréhensible des techniques issues de disciplines différentes, rassemblées en « boîte à outils » pour l'étude de milieux estuariens soumis à des agents dynamiques de forte énergie. Les limites de ces méthodes et les échelles de temps et d'espace qu'elles permettent de prendre en compte ont été détaillées. Les résultats obtenus grâce à ces techniques seront successivement exposés dans les chapitres thématiques qui suivent. La complémentarité de ces approches sera ensuite validée dans le Chapitre VII après discussion des résultats obtenus.

INTRODUCTION

L'Authie se situe sur une côte à dynamique mixte houle-marée (Anthony et Orford, 2002). Cette dynamique particulière lui confère quelques aspects morphologiques originaux et des interfaces environnementales marquées.

Ce chapitre décrit les principaux aspects morphologiques à partir d'observations et de données de terrain notamment topographiques. L'hydrodynamique générale sera ensuite esquissée à partir de mesures à différents niveaux de l'estuaire. L'étude synchronique de la morphologie sera ensuite interprétée au regard de ces résultats.

1. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES

1.1. MORPHOLOGIE GENERALE

L'Authie est un estuaire macrotidal, voire mégatidal, (marnage de vives-eaux égal à 8,5 m à son embouchure) qui constitue le terminus d'un petit fleuve côtier de 95 km de long. Bien que le débit du fleuve drainant un bassin versant de 984 km² soit modéré (débit moyen de 12 $m^3.s^{-1}$), son estuaire est relativement large et étendu avec un domaine intertidal d'environ 22 km².

L'estuaire se situe sur une côte sableuse rectiligne sous l'influence conjointe de marées dominées par le flot qui porte vers le Nord et renforcées par l'action du vent et de la houle majoritairement de secteur Sud-Ouest. Le littoral de part et d'autre de l'embouchure est caractérisé par des cordons dunaires (Figure 3.1B) interrompus par les infrastructures urbaines. Il est bordé de plages à barres intertidales bien formées (Figure 3.1A). Le contexte fortement énergétique favorise des flux de sable qui dessinent l'embouchure: flèche sableuse en accrétion en rive Sud (poulier) et massifs dunaires assujettis à une forte érosion en rive Nord (musoir) (Briquet, 1930) (Figure 3.1C et D). Ces apports conséquents de sables sont à l'origine de la création d'une deuxième flèche sableuse à l'intérieur de l'estuaire (Anthony et Dobroniak, 2000).

Ce schéma dynamique contrasté régule la morphologie interne de l'estuaire. Le chenal principal de l'Authie se divise en plusieurs bras qui divaguent encore librement dans l'estuaire moyen (Figure 3.1E), formant de nombreux bancs de sables. La distribution des aires de sédimentation fine (Figure 3.1F) et, par conséquent, le développement des marais

salés (Figure 3.1G) sont étroitement reliés à des zones à caractère abrité vis-à-vis des principaux agents dynamiques. Elles sont donc présentes en fond d'estuaire puis plus en aval suivant le degré d'obstruction de l'embouchure par le sable. Les marais salés présentent un réseau dense de chenaux de marée ainsi que de nombreuses huttes de chasses associées à de petites mares.

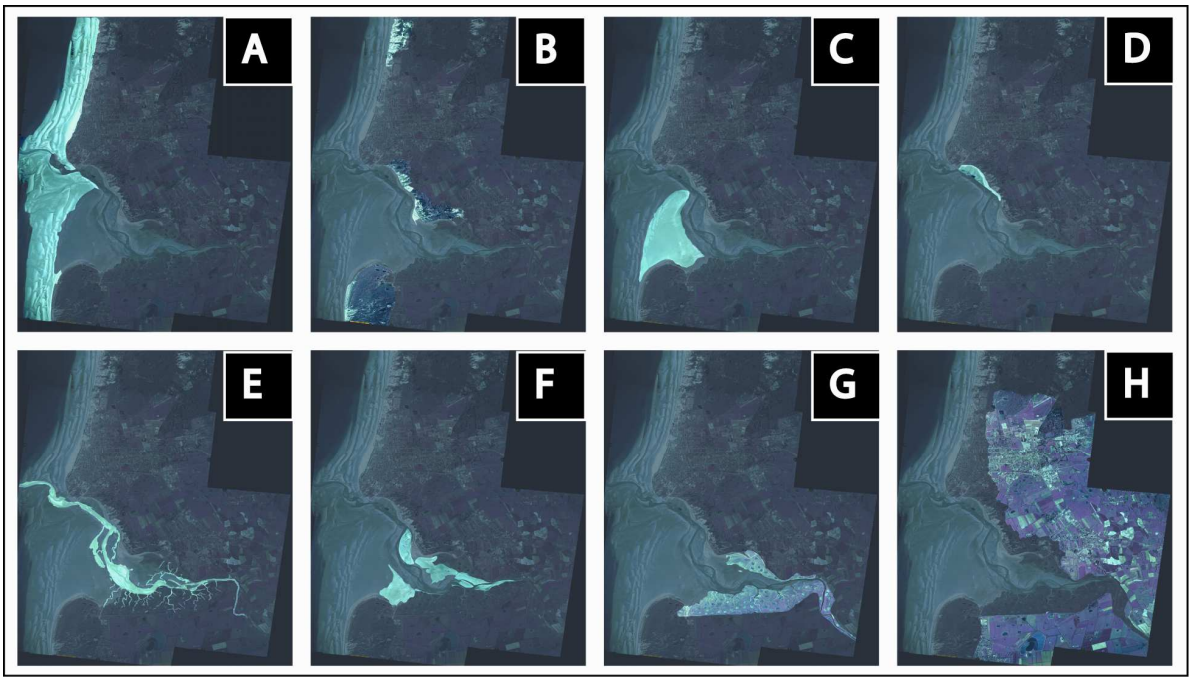


Figure 3.1. Principaux aspects de la morphologie de l'estuaire de l'Authie (Trentesaux, 2005)
A. Embouchure présentant des deltas de flot et de jusant, bordée de plages à barres et à bâches ;
B. Cordons dunaires ; **C.** Poulier ; **D.** Musoir ; **E.** Chenal principal et nombreux chenaux de marée ;
F. Vasières ; **G.** Marais salés ; **H.** Polders.

Figure 3.1. *Main aspects of the Authie estuary morphology (Trentesaux, 2005)*
A. *Estuary mouth presenting flood and ebb deltas, bordered by beaches with ridges and runnels;*
B. *Dunes;* ***C.*** *"Poulier" (estuarine accreting cell with sand spit);* ***D.*** *"Musoir"(estuarine eroding cell);* ***E.*** *Main channel and numerous tidal creeks;* ***F.*** *Mudflats;* ***G.*** *Salt marshes;* ***H.*** *Embankments.*

L'Authie a une longue histoire d'occupation humaine. Les premières structures anthropogéniques majeures ont été les endiguements qui ont débutés en 1158 en rive sud afin de protéger les plaines inondables et poldériser des terres pour l'agriculture (Figure 3.1H). Le schéma de ces aménagements a ensuite accompagné la progression des marais jusqu'en 1862, date de la mise en place de la dernière digue qui va fixer artificiellement le trait de côte en rive Sud. Plus récemment, les efforts d'aménagement se sont surtout concentrés en rive nord (Figure 3.2) pour lutter contre la préoccupante érosion côtière qui met en danger les infrastructures de la ville de Berck. Ainsi différents ouvrages de défense ont été

successivement mis en place : digues, épis, brise-lame, enrochements. Les risques de submersion marine et de rupture du cordon dunaire se font maintenant plus menaçants sur la commune de Groffliers. Cependant, malgré une étude sur modèles numériques engagée par les deux régions concernées, Nord-Pas de Calais et Picardie, aucune décision n'a été prise à ce jour.

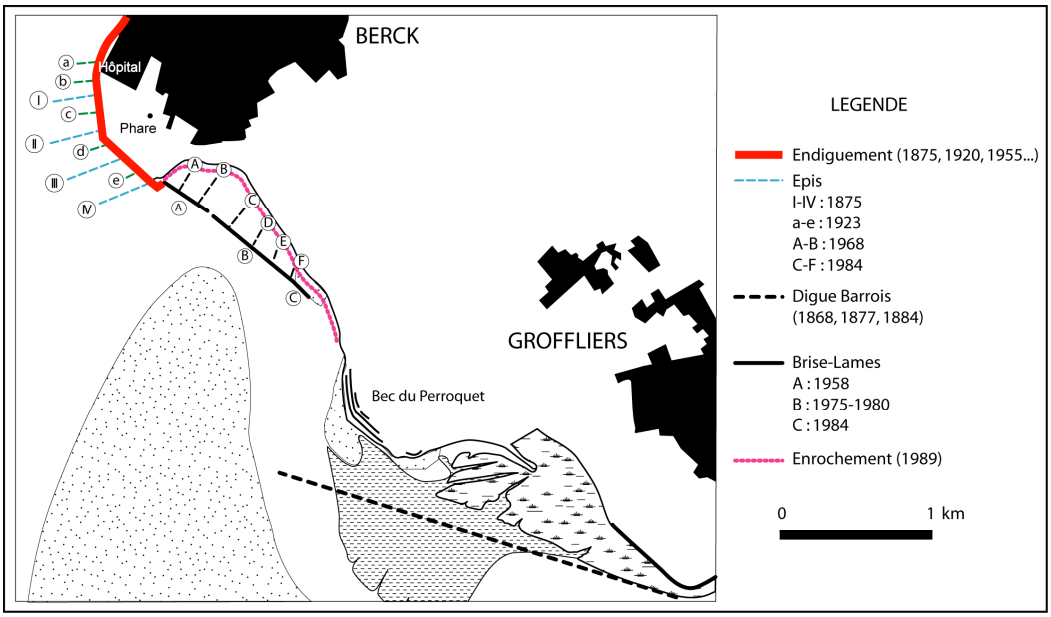


Figure 3.2. Chronologie des aménagements de la rive Nord de l'estuaire (d'après Dobroniak et Anthony, 2002).

Figure 3.2. *Chronology of northern bank management (from Dobroniak and Anthony, 2002).*

1.2. TOPOGRAPHIE DE L'ESTUAIRE

De nombreuses mesures topographiques ont été réalisées sur la période 2003-2004. Ces acquisitions ont également bénéficié de relevés antérieurs (Dobroniak, 2000 ; Marion, 2002) et ont parfois fait l'objet de suivis utilisés plus précisément dans les études diachroniques. Nous avons découpé ce volet en trois grands secteurs : le domaine d'embouchure et l'estuaire moyen puis la rive nord de l'estuaire qui a bénéficié d'un suivi plus intense.

1.2.1. L'EMBOUCHURE

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le domaine d'embouchure présente deux aspects morphologiques couplés qui placent l'Authie dans les estuaires dits de type picard,

selon la terminologie de Briquet (1930) : le poulier (flèche sableuse) et le musoir (baie d'érosion). Nous ajouterons à ces deux éléments la description de la deuxième flèche qui s'est développée en position interne, les études précédentes ayant démontré sont appartenance active à la dynamique sableuse d'embouchure (Anthony et Dobroniak, 2002). Les profils effectués et leur localisation respective sont présentés dans la Figure 3.3.

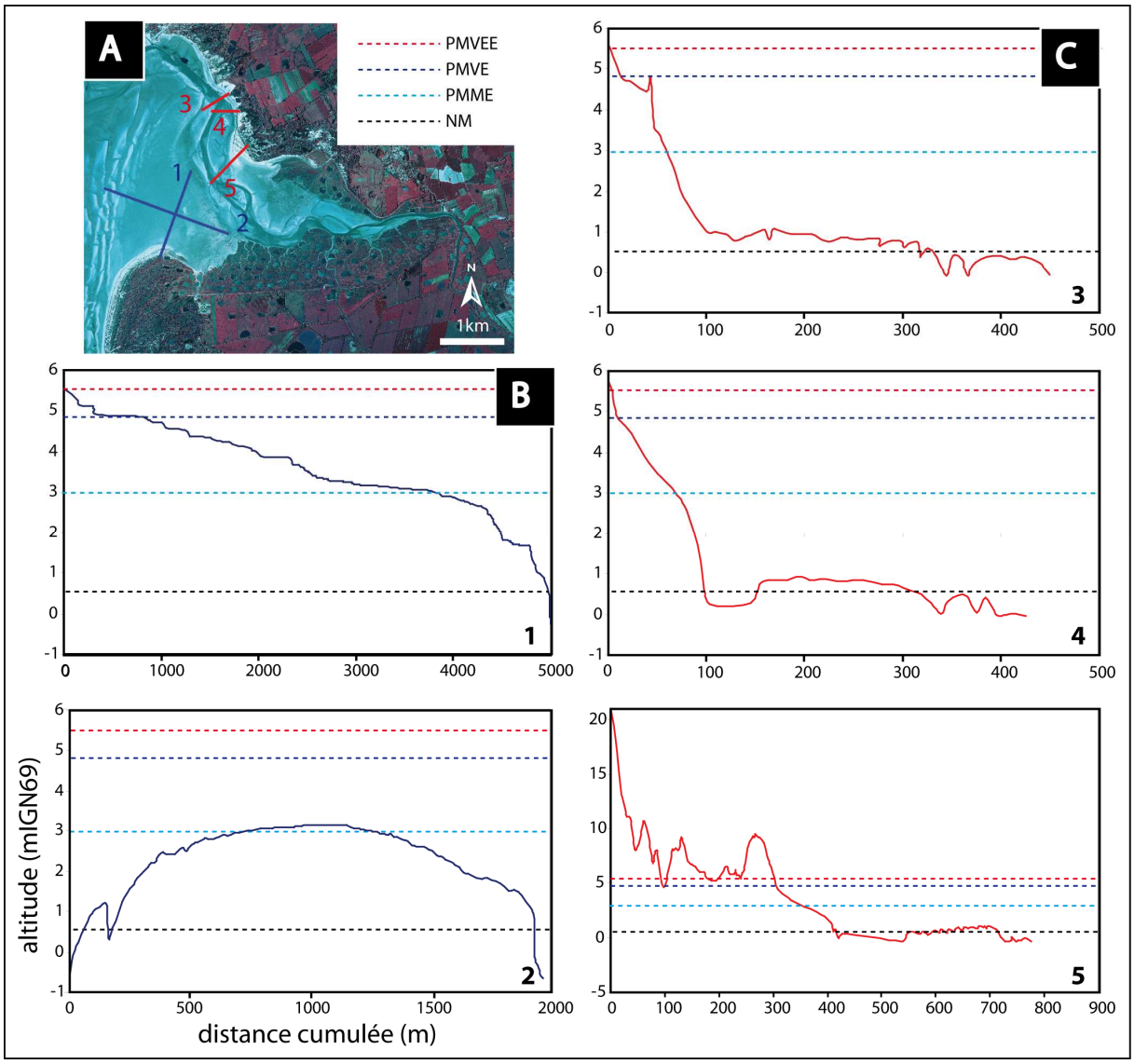


Figure 3.3. Topographie de l'embouchure de l'estuaire
A. Localisation des profils ; **B.** Poulier (profils 1 et 2) ; **C.** Musoir (profils 3 et 4) et flèche sableuse interne (profil 5).

Figure 3.3. *Estuary mouth topography*
A. *Profile location;* ***B.*** *"Poulier" (profiles 1 and 2);* ***C.*** *"Musoir" (profiles 3 and 4) and internal sand spit (profile 5).*

Le poulier de la rive Sud repose sur une vaste plate-forme. Cette flèche présente une section asymétrique avec une pente légèrement moins forte sur son front, où l'on peut observer des barres typiques de plages intertidales, que sur son revers vers l'intérieur de l'estuaire (autour de 0,3 %) (Figure 3.3B2). Le profil longitudinal (Figure 3.3B1) présente quant à lui une pente très douce (0,065 %). La masse sédimentaire représentée par cette flèche n'est submergée qu'en PMVE. La masse d'eau dispose alors d'environ 1,5 m pour évoluer au dessus de l'accumulation sableuse.

Le musoir se compose actuellement de trois anses érodées : la première est protégée par plusieurs brise-lames submersibles (Figure 3.4A), la deuxième par un enrochement en pied de dune (Figure 3.3C3 et Figure 3.4B) et la troisième nouvellement formée ne dispose d'aucun aménagement de protection (Figure 3.3C4). Des bancs de tourbes témoignent d'une ancienne position de cordon dunaire (Figure 3.4C). La chronologie des aménagements (Figure 3.2) témoigne de la dynamique érosive en rive Nord et du déplacement de son front vers l'amont de l'estuaire. Le long du musoir, les estrans s'établissent sur de courtes distances (inférieures à 100 m) et leurs pentes sont très abruptes, respectivement de 5,7 à 17,3 % entre le niveau de PMVEE et de PMVE, et de 3,23 et 4 % entre le niveau de PMVE et de PMME. Cette morphologie permet à une PMVE de dépasser tout juste les enrochements et à une PMVEE d'attaquer le pied de dune (Figure 3.3C3).



Figure 3.4. Lutte contre l'érosion et témoins du recul dunaire
A. Brise-lame (1ère anse); **B.** Enrochements (2ème anse) et début de la 3ème anse ; **C.** Témoignages du recul des dunes (3ème anse) : réimplantation sur l'estran en 2004 d'une tête de station en haut de dune en 1999 (à gauche) et banc de tourbe se fragmentant (à droite).

Figure 3.4. *Fight against erosion and indices of dune erosion*
A. *Breakwater (1st cove);* ***B.*** *Rock armouring (2nd cove) and beginning of the 3rd cove;* ***C.*** *Dune erosion signs (3rd cove): relocation of a benchmark in the tidal flat (2004) previously located in the upper dune in 1999 (on the left) and fragmented peat layer (on the right).*

Le profil 5 présente une section à travers la flèche sableuse interne (Figure 3.3C5) appelée parfois contre-poulier du fait de sa symétrie avec le poulier principal de la rive Sud. Délimitée par une passe tidale bordée de deux crochets se refermant en amont (Figure 3.5A),

on peut y observer la succession de plusieurs cordons dunaires orientés de façon perpendiculaire aux vents dominants (Figure 3.5B). La pente de l'estran s'affaiblit significativement (4 %) et le bas de plage présente de nombreuses dunes hydrauliques 3D (mégarides) témoignant du fort hydrodynamisme local (Figure 3.5B et C).



Figure 3.5. Principales caractéristiques du musoir
A. Passe tidale et dunes embryonnaires ; **B.** Cordons successifs de dunes ; **D.** Détail des mégarides (chenal principal, avant la flèche sableuse interne).

Figure 3.5. *"Musoir" main characteristics*
A. *Tidal pass;* ***B.*** *Successive dune ridges;* ***D.*** *Megaripples (main channel, before the inner sand spit).*

1.2.2. L'ESTUAIRE MOYEN

Afin de décrire la morphologie de l'estuaire interne, nous avons réalisé six profils quasi-continus de la Rive Sud à la Rive Nord (Figure 3.6). Seuls quelques chenaux profonds infranchissables et le lit du chenal principal n'ont pu être précisément référencés en altitude.

En rive Nord, les profils sont globalement convexes entre les niveaux de PMVE et de PMME et leur pente se redresse progressivement d'aval en amont jusqu'à devenir plane. Le premier profil est interrompu en partie haute par un cordon dunaire puis présente deux « bourrelets » jusqu'à un bras assez profond du chenal principal. Le dernier bourrelet est observable sur tous les profils mais son ampleur s'atténue vers l'amont. La fin du profil coupe les différentes dunes hydrauliques ainsi qu'une large barre de méandre. La partie haute du premier profil est très peu végétalisée juste après le deuxième cordon dunaire. En revanche, de véritables marais sont présents très largement sur les profils suivants. Les chenaux de marée y sont peu développés et leurs berges sont majoritairement convexes. Les marais salés présentent ici deux modes de transition distincts : progressif (Figure 3.6, profil 2) et abrupt avec une microfalaise (Figure 3.6, profil 6). Leur altitude décroît d'aval en amont. Le marais du deuxième profil s'étend notamment vers un estran légèrement concave tout d'abord

colonisé par des buttes de spartine puis entrecoupé de nombreux chenaux très peu profonds dans sa partie basse, ce qui donne cet aspect ondulé à la topographie.

La rive Sud est, quant à elle, uniquement constituée de marais. Seul le premier profil présente une transition plus progressive en partie basse. Les profils présentent tous une topométrie plane avec parfois une pente très faible en partie distale mais rompue systématiquement par une microfalaise d'érosion jusqu'au chenal principal. Ils sont installés à différentes altitudes avec la même tendance observable qu'en rive Nord. Ce marais est entrecoupé de très nombreux chenaux qui oscillent le plus souvent entre 0,5 et 1,5 m de profondeur mais qui peuvent être par endroits très profonds (> 2,5 m). De manière générale, les chenaux présentent une profondeur et une densité plus importantes d'amont en aval et sont également plus étroits. Les berges de ces chenaux sont concaves sur les profils en amont et sur les parties distales des profils, et convexes en aval et en haut de marais. Globalement, les profils de la rive Nord sont plus élevés que ceux de la rive Sud et leurs altitudes respectives sont plus élevées en allant vers l'aval.

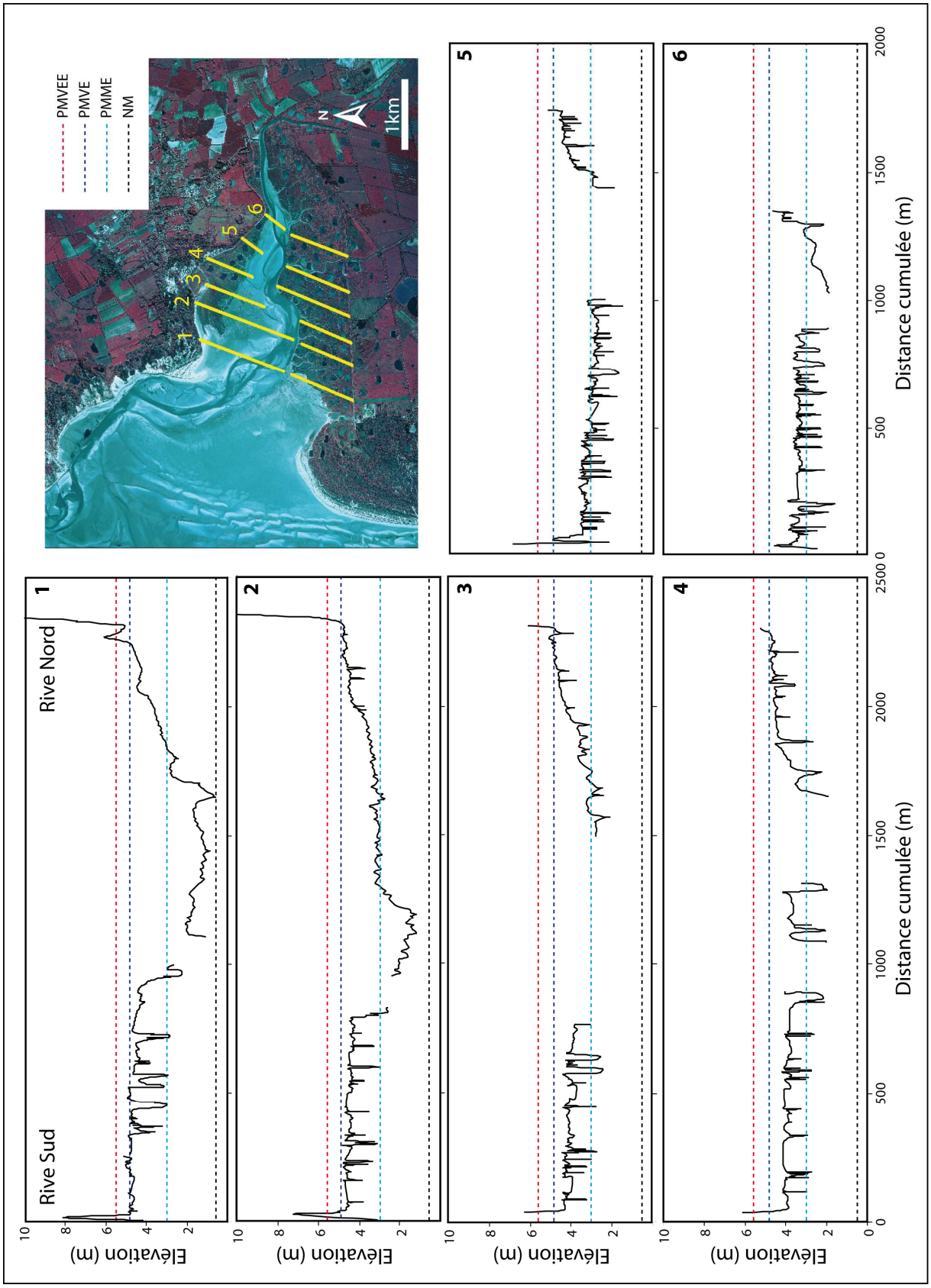


Figure 3.6. Topographie de l'estuaire moyen selon six profils Sud-Nord d'aval en amont de l'estuaire (les élévations sont exprimées par rapport à la cote IGN69).

Figure 3.6. *Mid estuary topography with six North-South profiles from downstream to upstream (elevations are expressed with regards to IGN69 system).*

1.2.3. LA RIVE NORD

La rive Nord présente toutes les unités géomorphologiques décrites au sein de l'estuaire ainsi qu'une dynamique sédimentaire importante. Elle a donc été privilégiée lors des différentes acquisitions et a été de surcroît l'objet d'une campagne LIDAR.

Différents modèles numériques de terrain (MNT) ont ensuite été réalisés à partir du jeu de données altimétriques géoréférencées obtenu avec le LIDAR (Figure 3.7). Le MNT en relief (Figure 3.7A) met en évidence la structure du chenal principal. Des barres de méandres, des bancs intertidaux ainsi que de nombreuses dunes hydrauliques en face de la flèche interne y sont aisément observables. Le réseau de chenaux de marée et leurs profondeurs respectives se dessinent ainsi que les chenaux d'écoulement de l'estran. Les marais s'établissent entre 5 et 6 m IGN69 et sont signalés en vert. On peut remarquer les deux types de transitions sur cette zone : progradante à gauche et à microfalaise à droite. Sur le MNT contouré (Figure 3.7B), les surfaces blanches en amont du « Bec du Perroquet » représentent des zones faiblement végétalisées. Ce MNT nous permet de visualiser l'orientation et l'organisation en parallèle des crêtes de dunes sur le contre poulier mais également la présence de deux crochets plus en aval, sur le marais. Le premier est une passe tidale encore active, le deuxième est un crochet désormais vestigial. Les niveaux moyens d'action des marées ont été replacés spatialement sur le 3ème MNT (Figure 3.7C). Au niveau du musoir, on remarque que l'estran sur la première anse en arrière des brises lames est plus large que sur les suivantes et on peut observer un affinement du cordon dunaire peu avant la flèche interne. Le pied de dune n'est attaqué qu'en cas de PMVEE en aval du bec alors qu'à l'embouchure il est vulnérable également aux PMVE. La zone de balancement des marées est plus étendue au centre de la zone d'étude qui présente une pente faible sur les profils. On s'aperçoit également que le réseau de chenaux est bien plus dense que ne laissait apparaître les autres représentations des données altimétriques, notamment dans sa partie orientale.

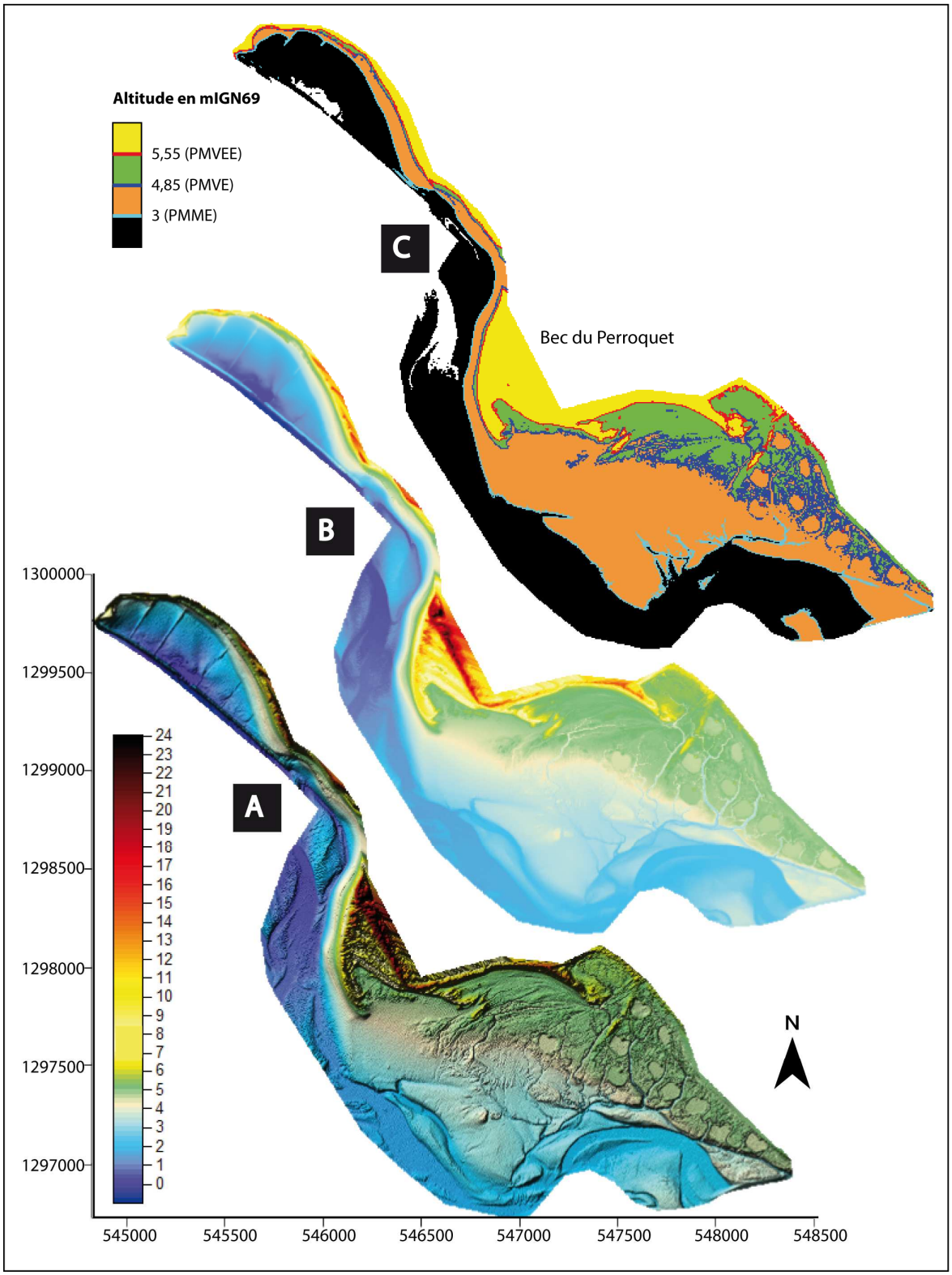


Figure 3.7. Modèles numériques de terrains (MNT) réalisés à partir des données LIDAR
A. MNT « en relief » ; **B.** MNT contouré ; **C.** MNT présentant les niveaux moyens de la marée.

Figure 3.7. *Elevation Digital Models (DEM) realised from LIDAR data*
A. *DEM « in relief »;* ***B.*** *DEM outlined;* ***C.*** *DEM showing mean levels of tide.*

1.3. ESTRANS ET CHENAUX

La topographie conditionne la position des unités géomorphologiques au sein de l'estuaire tout comme certains aménagements notamment en rive Nord. La Figure 3.8 adaptée d'une carte géomorphologique de 1998 localise ces différentes unités.

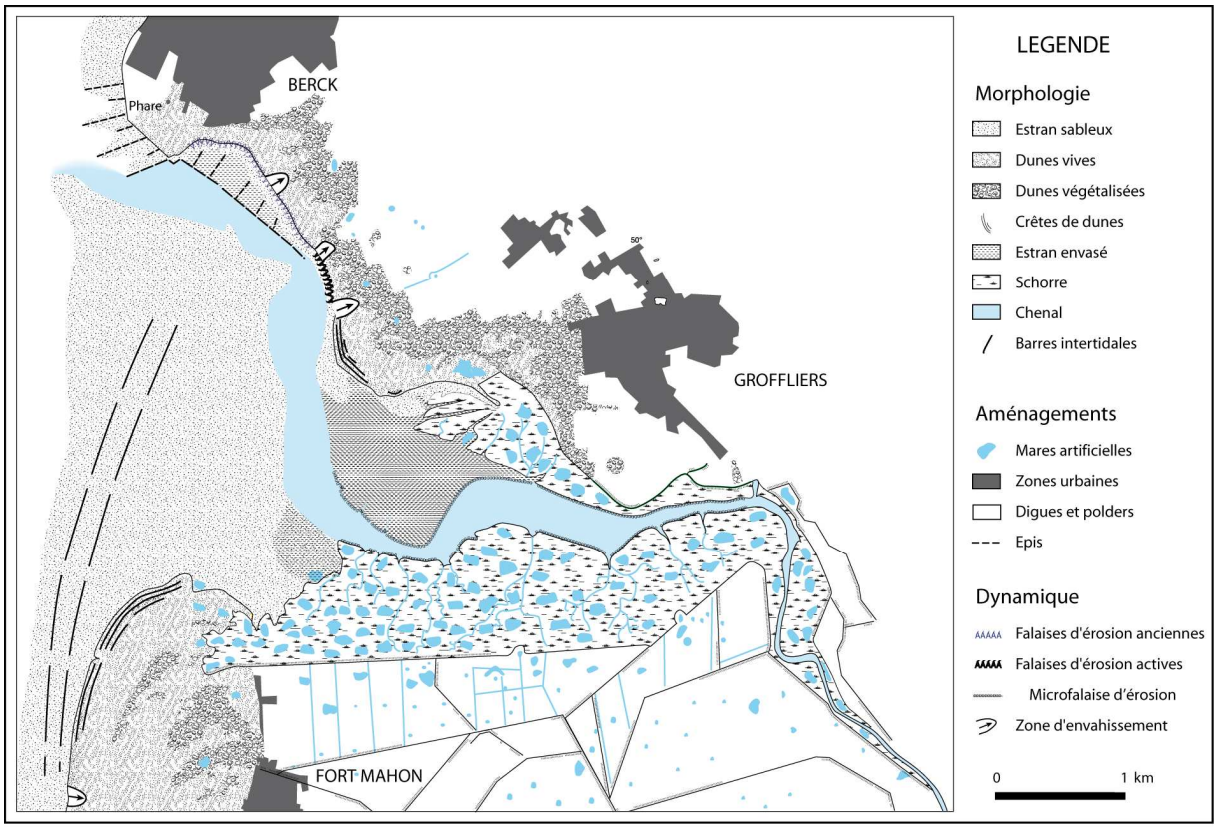


Figure 3.8. Répartition des différentes unités géomorphologiques (modifié de Dobroniak et Anthony, 2002).

Figure 3.8. *Distribution of the different geomorphological units (modified from Dobroniak and Anthony, 2002).*

Les estrans sableux se situent typiquement à l'embouchure de l'estuaire. Les plages situées de part et d'autre de l'exutoire de l'Authie sont caractérisées par des barres et des bâches alors que les estrans plus à l'intérieur de l'estuaire sont structurés bien différemment comme nous l'avons décrit précédemment. Les surfaces plus envasées se situent quant à elles à l'abri des ouvrages anthropiques, notamment le brise-lame qui constitue à son revers une zone de décantation préférentielle, et à l'arrière des flèches sableuses. L'accumulation importante de particules fines en aval de la flèche interne forme la surface la plus envasée de l'estuaire. Les estrans végétalisés ou marais salés s'établissent quant à eux de part et d'autre

du chenal principal et en arrière des flèches sableuses. Ils s'apparenteraient à un modèle situé entre celui de marais frangeant et d'arrière barrière (Figure 3.9A) en raison de la présence des deux flèches. De manière générale, le réseau dense de chenaux peut être qualifié de dendritique méandriforme témoignant ainsi d'un fort hydrodynamisme local et d'une certaine maturité (Figure 3.9B).

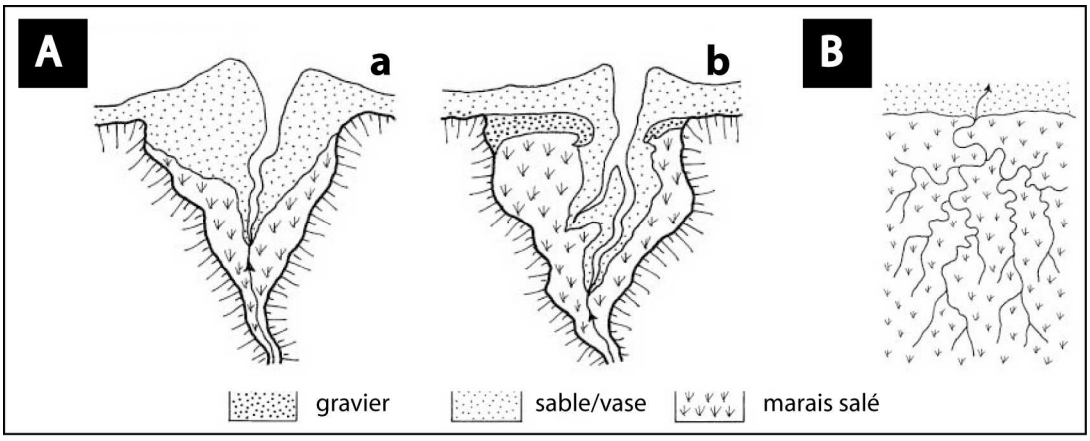


Figure 3.9. Classifications des marais salés et de leurs chenaux (d'après Pye et French, 1993a)
A. Classification géomorphologique des marais salés : marais frangeants **(a)** et d'arrière barrière **(b)** ;
B. Classification des réseaux de chenaux de marée : dendritique méandriforme.

Figure 3.9. *Classification of salt marshes and their tidal creeks (from Pye and French, 1993a)*
A. *Geomorphologic classification of salt marshes: fringing* ***(a)*** *and back barrier* ***(b)*** *marshes;*
B. *Classification of tidal creek networks: dendritic meandering.*

Après cette présentation succincte, ces différents environnements vont être décrits plus précisément d'un point de vue sédimentologique et écologique complétant les descriptions morphologiques et apportant quelques précisions sur leurs microtopographies.

1.3.1. LES PLAGES ESTUARIENNES ET LES VASIERES

Les estrans non végétalisé sont définis suivant les caractéristiques granulométriques du sédiment superficiel dont ils sont composés. Ainsi, on appellera plage estuarienne un estran sableux situé à l'intérieur de l'estuaire et vasière un estran présentant un sédiment de granulométrie plus fine (argiles et silts) (Figure 3.10).



Figure 3.10. Estrans en Authie
A. Estran silto-sableux en amont de la flèche interne ; **B.** Vasière et butte de spartine ; **C.** Plage du musoir.

Figure 3.10. *Authie tidal flats*
A. *Silt to sandy tidal flat upstream of the inner sand spit;* ***B.*** *Mudflat and Spartina patches;* ***C.*** *"Musoir" sand flat.*

Il s'agit d'employer ces termes de façon nuancée car les variations granulométriques observées sur les estrans peuvent être graduelles tout comme excessivement brutales. Afin de caractériser la zone de transition principale entre les estrans sableux et vaseux, une étude à été menée en mai 2002 sur un secteur encadrant le « Bec du Perroquet » et comprenant la vaste plate-forme sablo-vaseuse jusqu'aux premiers espaces végétalisés en amont (Figure 3.11B).
La zone d'étude est caractérisée par des sédiments superficiels correspondant à des sables fins (mode principal entre 250 et 200 µm). Cependant, quatre stations présentent des sables moyens en limite inférieure de classe. Un sédiment très envasé dépassant une teneur de 60 % de fines n'a été observé que sur une seule station (Figure 3.11A). En excluant les cinq stations précitées, le grain moyen varie entre 266 et 79 µm. Les échantillons présentent également un large éventail de classement et d'asymétrie. Les analyses ont révélé des sédiments majoritairement assez bien à médiocrement classés (respectivement 40,6 % des observations soit 92 % pour cette gamme de tri) ainsi que des sédiments assez bien classés (14,8 %). Ils présentent de façon prédominante une asymétrie positive (49,5 %) mais sont cependant à peu près symétriques pour une large part (33,6 %). Les combinaisons les plus représentées de ces indices sont les suivantes : sédiments assez mal classés avec une asymétrie positive (34 %) et sédiments médiocrement classés à distribution symétrique (20,8 %) ou présentant une asymétrie positive (13,4 %).

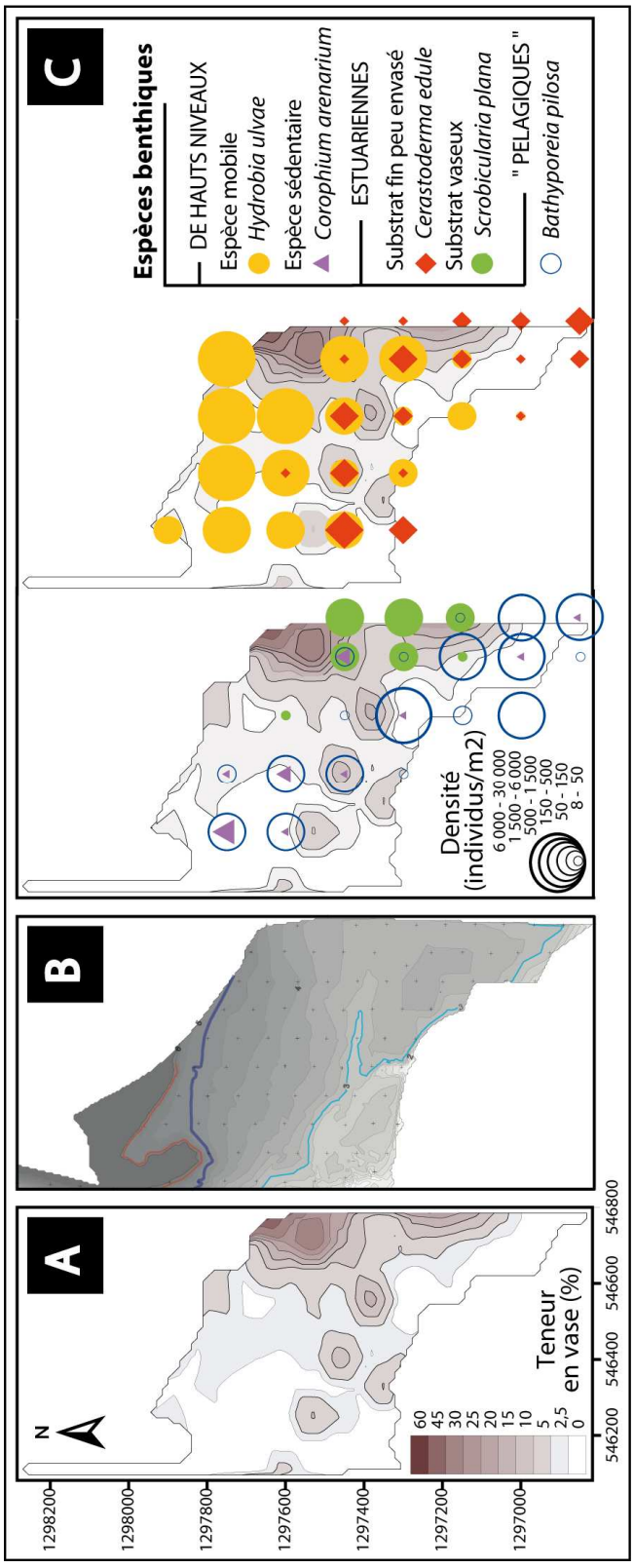


Figure 3.11. Etude de la transition entre deux types d'estrans (Marion *et al*., 2003)
A. Envasement (sédiment de taille inférieure à 63 µm) ; **B.** Topographie; **C.** Répartition et densité de quelques espèces macrozoobenthiques.

Figure 3.11. *Study of the transition between two tidal flat types (Marion et al., 2003)*
A. *Silting (grain size above 63 µm);* ***B.*** *Topography;* ***C.*** *Distribution and density of a few macrozoobenthic species.*

La cartographie des différents paramètres granulométriques nous permet de dégager quelques tendances générales. L'analyse révèle un gradient granulométrique d'aval en amont avec l'affinement du diamètre moyen des sédiments interrompu localement par la présence d'un chenal (Figure 3.11B). Globalement, le classement s'améliore suivant une direction inverse. Les sédiments sont mal classés au niveau de la végétation en place et d'un petit chenal également. Les sédiments sont très asymétriques vers les particules grossières au niveau du Bec du Perroquet et presque symétriques en aval et près du chenal principal. Ils présentent une asymétrie positive forte au niveau du marais et très forte autour du chenal de marée.

Afin de compléter cette étude, des sédiments ont été prélevés en septembre 2003 le long du profil P1 (Figure 3.12B). Quelques courbes granulométriques sont présentées en Figure 3.12A. On peut observer que le haut d'estran est caractérisé par un sable fin bien classé avec une très faible asymétrie (Figure 3.12C). Le sédiment s'affine vers le chenal et présente un aspect plurimodal vers les fines (Figure 3.12A3). Les bas niveaux présentent un sédiment mal classé et légèrement envasé ce qui lui confère une asymétrie positive forte.

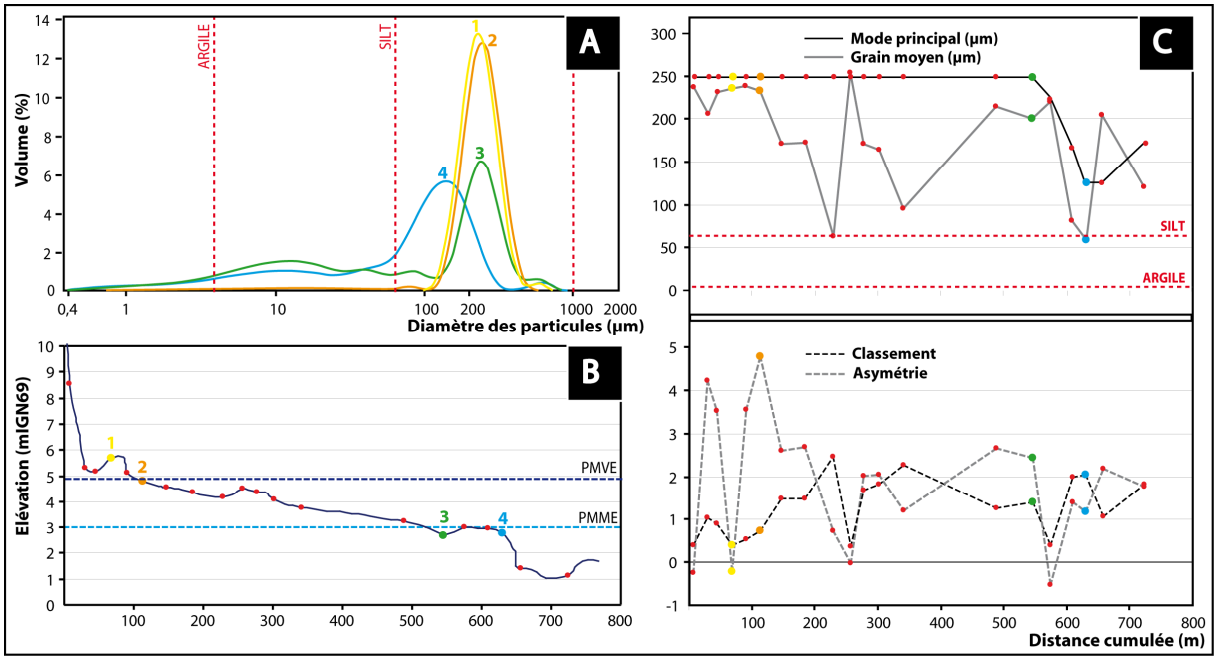


Figure 3.12. Granulométrie du profil P1
A. Courbes granulométriques représentatives des sédiments rencontrés ; **B.** Localisation des stations ; **C.** Indices granulométriques.

Figure 3.12. *Sediment grain size along the profile P1*
A. *Representative grain size curves of sampled sediments;* ***B.*** *Location of stations;*
C. *Grain-size parameters.*

Il est donc difficile de s'en tenir à la seule définition granulométrique afin de classer ces deux types d'estrans. La forme et la taille de l'envasement ne sauraient également être des critères décisifs. En revanche, la connaissance des biocénoses benthiques de ce substrat permet, à travers quelques espèces clefs, d'avoir une idée de la pérennité de cet état et donc de définir si on est en présence d'une réelle vasière ou d'une zone temporairement envasée. La Figure 3.11C rassemble la répartition et la densité d'espèces dont les affinités vis-à-vis des paramètres physiques sont mentionnées (sédimentologie, hydrodynamisme, topographie). On peut donc délimiter la vasière *sensu stricto* dans la partie orientale de la zone grâce à la présence abondante de *Scrobicularia plana* et noter la présence de deux zones d'envasement non stabilisé. La première à l'Ouest, sous la forme de trois poches associées à un chenal, est étayée par la présence de coques (*Cerastoderma edule*) et par un écoulement relativement modéré des masses d'eau (stabilisation des hauts niveaux de l'arrière de la flèche, *Corophium arenarium* associé à *Hydrobia ulvae*). La deuxième est située au nord de la vasière et se caractérise par l'absence d'espèces à signature estuarienne malgré une teneur en vase significative. Elle est ceinturée dans sa partie orientale par de nombreuses hydrobies et semble être une zone de décantation. L'application du modèle de Gao et Collins à cette zone va dans le sens de ces conclusions avec un transport résiduel orienté vers l'aval et les bas niveaux (Marion *et al*., 2004).

Les plages estuariennes sont donc caractérisées par des sables fins possédant un bon classement et quasi symétriques. Les vasières présentent, quant à elles, un sédiment fin, majoritairement silteux, très mal classé et à asymétrie positive forte, avec une distribution plurimodale (Figure 3.13). A ces observations générales s'ajoute une certaine variabilité crée par la présence de chenaux. Ceux-ci peuvent à la fois créer des envasements temporaires, comme nous venons de le souligner, mais également être les vecteurs d'apports de sédiments plus grossiers sur les vasières. Ainsi, alors que les hauts niveaux des vasières des profils P2 et P4 présentent des caractéristiques granulométriques presque similaires, les bas niveaux enrichis en silts plus grossiers et en sables fins montrent des différences importantes (Figure 3.13). La proximité du chenal semble être la raison principale de ces disparités. Cet argument est appuyé par la granulométrie des sédiments récoltés sur la vasière de la berge du chenal principal de la Madelon. Tandis que la fréquence des silts fins décroît d'aval en amont, celle des sables très fins augmente sur ces trois stations de bas niveaux. Ce gradient est accompagné de la réduction de l'espace existant entre ces zones et un chenal.

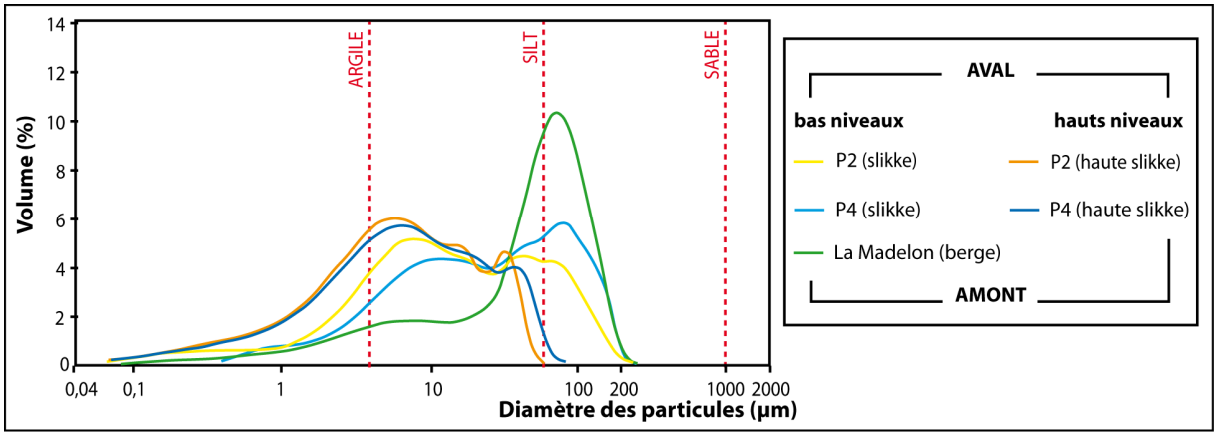


Figure 3.13. Granulométrie des sédiments de vasières.

Figure 3.13. *Grain size of mudflats.*

Les vasières présentent une teneur en vase allant de 76 à plus de 90 % et un taux de $CaCO_3$ compris entre 34 et 43 %. Le silt constitue la fraction majoritaire du sédiment total avec des valeurs de 42,5 à 90 %. La fraction argileuse n'est jamais supérieure à 4,5 % et se compose du cortège de minéraux suivant : smectite, illite, chlorite et kaolinite. Leurs teneurs par rapport à l'ensemble des minéraux argileux varient respectivement de 32 à 39 % pour l'illite, de 30 à 36 % pour la smectite, de 19 à 24 % pour la kaolinite et de 9 à 14 % pour la chlrorite. Les minéraux présents en plus grande quantité sont donc l'illite et la smectite.

Les fortes contraintes liées à l'intrusion saline font de ces milieux des habitats extrêmes où peu d'espèces peuvent survivre, particulièrement sur les vasières. La granulométrie fine de leurs sédiments superficiels rend la circulation de l'eau et de l'air difficile. En dessous d'une première épaisseur de sédiment plus ou moins bien aérée, les conditions sont asphyxiantes et le sédiment réduit, caractérisé par une couleur sombre et une odeur forte de soufre. Cependant ces espèces se développent souvent de façon abondante en raison de l'absence de concurrence et grâce à la richesse en éléments nutritifs de ce milieu. La Figure 3.14 rassemble les principales espèces macrozoobenthiques que l'on retrouve à l'intérieur de l'estuaire de l'Authie.

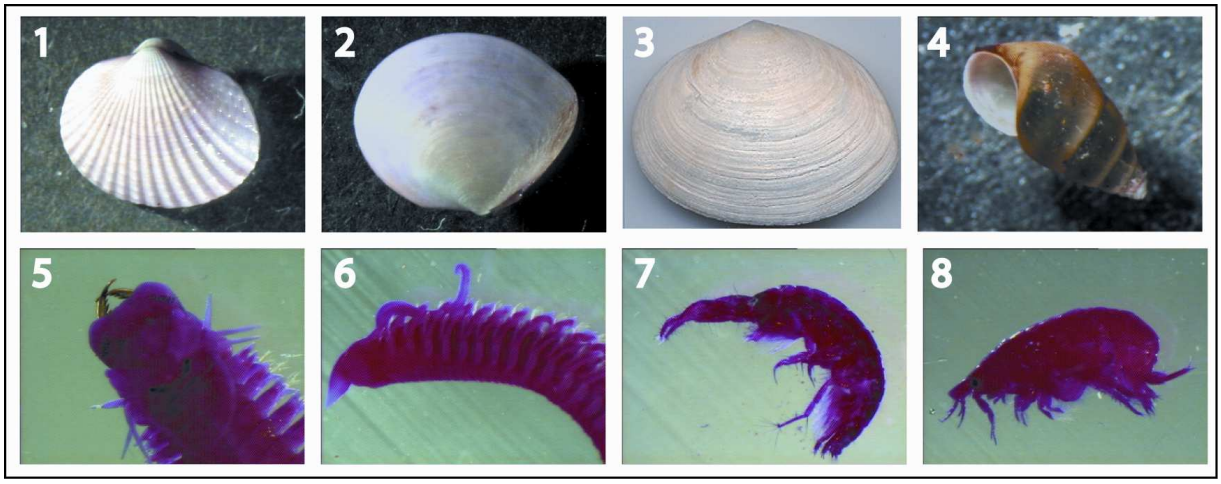


Figure 3.14. Principales espèces zoobenthiques en Authie (estuaire moyen) (web GEMEL)
1. *Cerastoderma edule* (coque) ; **2.** *Macoma baltica* ; **3.** *Scrobicularia plana* (scrobiculaire) ; **4.** *Hydrobia ulvae* (hydrobie), **5.** *Hediste diversicolor* ; **6.** *Pygospio elegans* ; **7.** *Corophium arenarium* ; **8.** *Bathyporeia pilosa*.

Figure 3.14. *Main zoobenthic species in the Authie* (inner estuary) *(web GEMEL)*
1. *Cerastoderma edule (cockle);* ***2.*** *Macoma baltica ;* ***3.*** *Scrobicularia plana;* ***4.*** *Hydrobia ulvae;* ***5.*** *Hediste diversicolor;* ***6.*** *Pygospio elegans;* ***7.*** *Corophium arenarium;* ***8.*** *Bathyporeia pilosa.*

La rive Nord présente une large zone intertidale envasée très riche en bivalves et annélides (notamment *Macoma baltica, Scrobicularia plana et Hediste Diversicolor*), ressources essentielles pour les oiseaux, ce qui confère à l'estuaire un rôle de nourrissage primordial. Des gisements importants de coques (*Cerastoderma Edule*) sont présents également en bas d'estran. Leur stock fait l'objet d'une évaluation annuelle afin de fixer notamment des quotas pour les pêcheurs à pied. Leur localisation montre une certaine variabilité en fonction de la contrainte hydrodynamique principale que constitue de chenal principal et sa divagation.

1.3.2. LES MARAIS SALES

Un marais salé littoral se décompose en deux parties, la slikke (du néerlandais "slijk" = "boue") et le schorre (du néerlandais "schor" = "pré salé"). La slikke est la partie basse, immergée à chaque marée alors que le schorre commence au-dessus du niveau moyen des marées de morte-eau. La fréquence et la durée des inondations de ces zones varient donc en fonction des coefficients de marée et du niveau topographique. Les espèces végétales capables de survivre sur des sols salés sont appelées halotolérantes. Dans la plupart des cas, elles disposent de mécanismes de régulation leur permettant de supporter des concentrations de sel élevées dans le sol. Seule la salicorne profite réellement de ces conditions salines qui l'avantagent dans son développement et peut être qualifiée d'halophyte *sensu stricto*.

La slikke possède un recouvrement de végétation inférieur à 25 % alors que le schorre lui est densément végétalisé. La végétation de la slikke est qualifiée de pionnière dans le contexte évolutif d'un marais salé comme nous le verrons par la suite et se compose d'une ceinture quasi monospécifique de végétation, le plus souvent très largement dominée par la spartine *Spartina anglica* (Figure 3.15) voire la salicorne dans certains secteurs en Authie notamment en rive Sud. On peut distinguer une zone pré-pionnière qui représente la première étape de colonisation de la vasière avec un recouvrement inférieur à 5 % et la zone pionnière avec un recouvrement compris entre 5 et 25 %.



Figure 3.15. Modes de progression de *Spartina anglica* : ceinture monospécifique progradant par buttes ou par semis sur la vasière.

Figure 3.15. *Spartina anglica progression modes: monospecific belt prograding by patches or by seed propagation on the mudflat.*

On observe ensuite une zonation typique de la végétation en relation avec la contrainte d'immersion et de salinité. La végétation est alors le plus souvent organisée en communautés plurispécifiques (Figure 3.16).



Figure 3.16. Communautés végétales plurispécifiques de haut (à gauche) et de moyen schorre (à droite).

Figure 3.16. *Plurispecific plant communities of upper (on the left) and mid salt marsh (on the right).*

Cette dynamique est fortement liée aux niveaux altimétriques comme le suggère l'organisation de ces communautés végétales en ceintures successives (Figure 3.17). Cet agencement est toutefois localement déstructuré par les réseaux de chenaux de marée d'une part et par des variations micro-topographiques liées à la nature du substrat des marais (cuvettes) et aux aménagements effectués par les chasseurs (huttes) d'autre part.

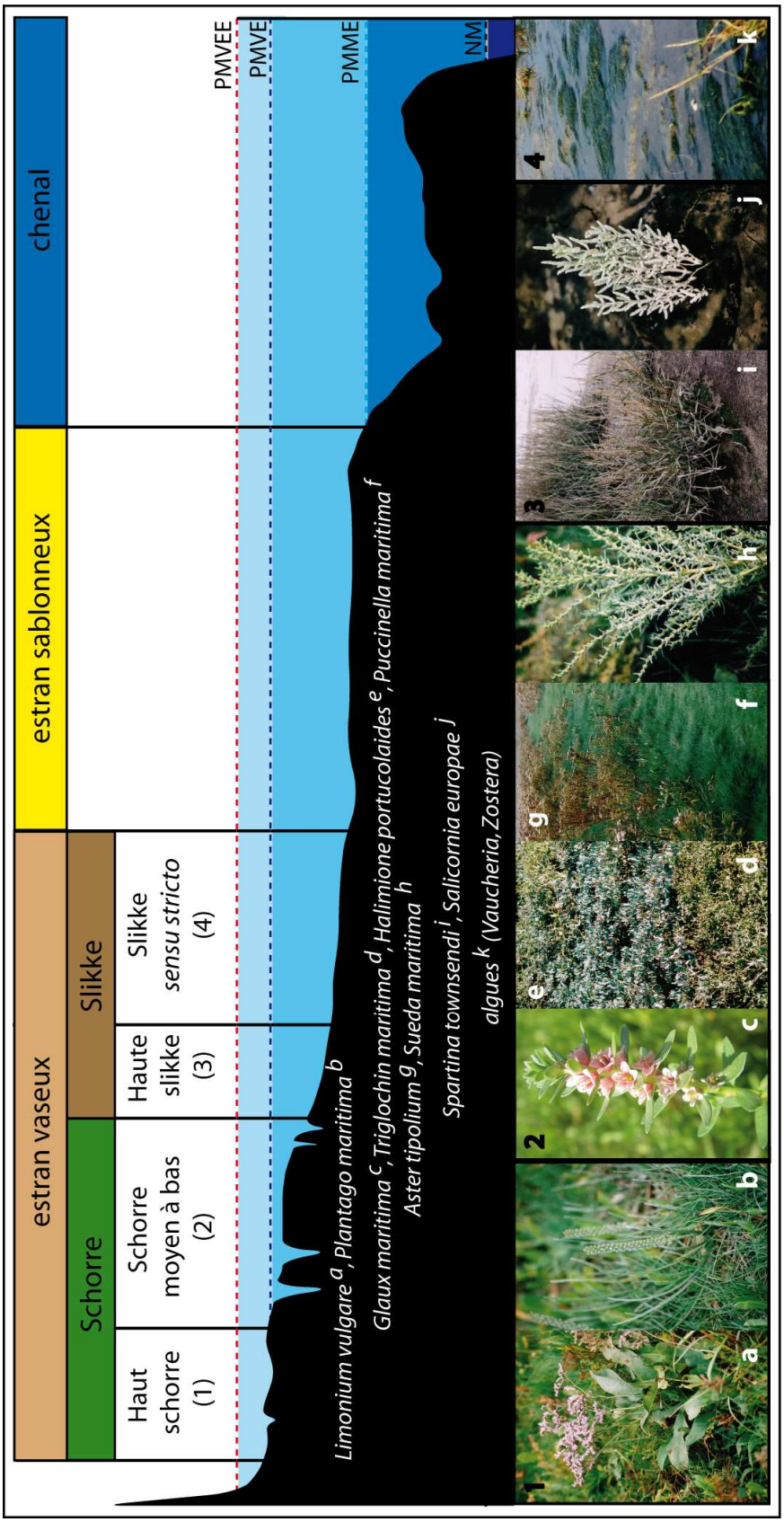


Figure 3.17. Répartition des espèces végétales selon le niveau d'action des marées et la cote altimétrique.

Figure 3.17. *Distribution of plant species according to tidal and topographic levels.*

La rive Nord de l'estuaire illustre parfaitement ce schéma alors qu'en rive Sud les communautés végétales présentes à certains niveaux altimétriques sont représentatives de niveaux normalement plus bas. Les durées et les fréquences d'inondation des PMVE sont en effet beaucoup plus importantes sur les marais de la rive Sud ce qui est un facteur primordial pour la végétation en place. Ceci pourrait être un effet visible de l'endiguement précoce de cette rive (Figure 3.18). Ce phénomène, appelé confinement littoral contraint ou « coastal squeeze », a été décrit par French (1997). Dans le cas de l'Authie, la réduction de la largeur du schorre ne peut être observée en raison de la transition en microfalaise qui caractérise globalement cette rive.

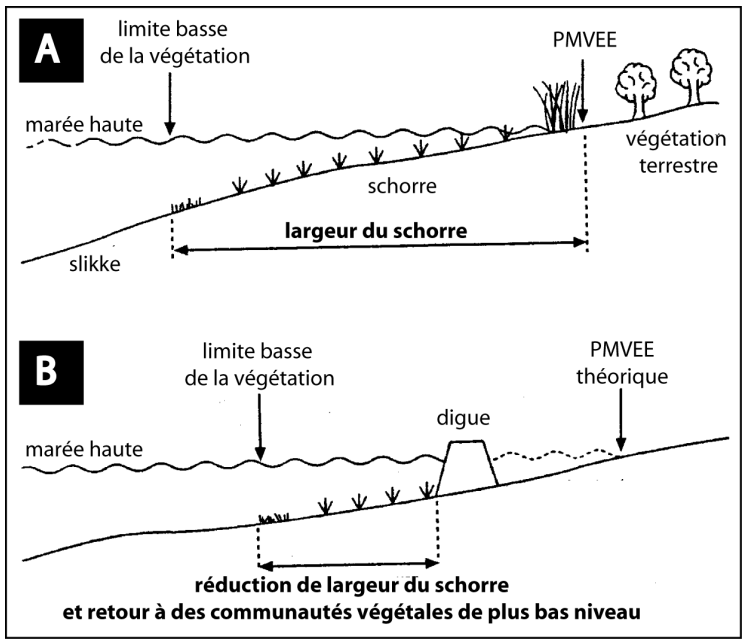


Figure 3.18. Effet des endiguements sur les habitats intertidaux (d'après French, 1997)
A. Etat initial ; **B.** Après construction de la digue.

Figure 3.18. *Effects of embankments on intertidal habitats (from French, 1997)*
A. *Initial state;* ***B.*** *After embankment.*

Il est important de constater que l'Authie présente non pas un mais des marais salés, à des stades d'évolutions différents. Dès que le niveau de sédiments fins déposés sur la vasière atteint une élévation suffisante, des végétaux supérieurs possédant une forte halo-tolérance vont pouvoir progressivement s'installer. Cette colonisation primaire qui représente le stade initial de l'édification d'un marais salé fait place ensuite à l'apparition progressive d'un cortège végétal plurispécifique de schorre. Au cours de l'évolution des marais salés, la zone dite pionnière progresse vers un contexte plus ouvert et l'arrière marais, encore inondé de temps à autre, continue d'évoluer vers un système terrestre.

Ces étapes sont bien résumées par deux modèles conceptuels complémentaires (Figure 3.19).

Le **modèle de French-Stoddart** (French, 1993) (Figure 3.19A) se base sur l'évolution de l'altimétrie des marais et de leur forme en relation avec les niveaux de marée ainsi que sur l'approfondissement des chenaux.

Le **modèle de Pethick-Steel-Pye** (Pethick, 1969 ; Steel et Pye, 1997) (Figure 3.19B) utilise quant à lui les caractéristiques spatiales du réseau de chenaux de marée pour décrire les différentes phases d'évolution de ces même marais.

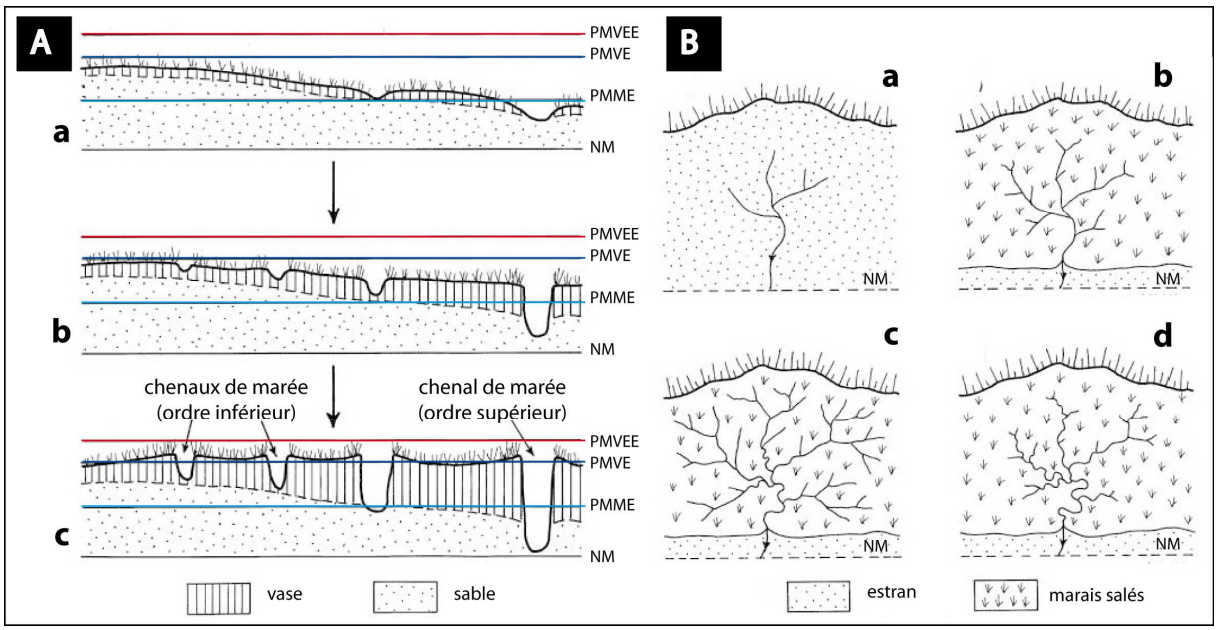


Figure 3.19. Modèles conceptuels d'évolution des marais salés
A. Modèle de French-Stoddart **a.** Jeune marais en situation basse dans la gamme des niveaux moyens d'action des marées avec des chenaux en début de formation par sédimentation différentielle et présentant un profil globalement convexe ; **b.** Profil convexe avec des plates-formes plates à concaves et un réseau de chenaux s'approfondissant par érosion du lit **c.** Marais mature dont le profil est droit avec un réseau bien développé de chenaux bordés de levées et des plates-formes concaves.
B. Modèle de Pethick-Steel-Pye **a.** Estran dépourvu de végétation avec des lignes de drainage ; **b.** Jeune marais avec un patron simple de chenaux hérités de l'estran ; **c.** Marais bien développé avec un réseau de chenaux très dense et complexe ; **d.** Marais mature montrant une augmentation de la sinuosité des chenaux avec l'abandon de certains drains ainsi que le développement de terrasses internes.

Figure 3.19. *Conceptual models of salt marshes evolution*
A. *French-Stoddart model* ***a.*** *Marsh in early youth low in the tidal frame showing low density of tidal creeks and with a global convex shape of the profile;* ***b.*** *Convex profile with platform elements flat to concave-up with high density of channels deepening by erosion at the channel floor;* ***c.*** *Mature marsh horizontal overall with concave-up platform elements and high density of well developed, leveed creeks.*
B. *Pethick-Steel-Pye model* ***a.*** *Tidal flat with simple, low density drainage network ;* ***b.*** *Youthful marsh low in the tidal frame with simple creek pattern inherited from tidal flat;* ***c.*** *Well developed marsh with very extensive, complex, high density tidal creek network;* ***d.*** *Mature marsh with creeks suffering abandonment, the development of internal terraces and the increasing of sinuosity.*

Si l'on reprend la description des profils de la Figure 3.6, on peut en déduire que les marais situés en amont de l'estuaire se sont développés bien avant ceux situés plus en aval sur la rive Sud qui présentent quant à eux des caractéristiques attribuées à de jeunes marais. Ce gradient est également observable en rive Nord même si cette zone présente de manière générale des marais plus jeunes qu'en rive Sud, notamment dans sa partie occidentale. Ces aspects abordés ici de manière descriptive seront plus largement développés en termes d'évolution dans le Chapitre VI.

Le substrat des marais littoraux est essentiellement constitué de sédiments fins, silts et argiles. Sur le profil P4, la bordure du marais (Figure 3.20A2) présente un sédiment fin, clairement plurimodal et majoritairement silteux. A des niveaux altimétriques plus faibles, du sable fin peut se retrouver sur les bordures des chenaux, déposés lors du débordement de ceux-ci lors des PMVE. De la crème de vase a été échantillonnée plus bas dans un chenal (Figure 3.20A4). Le sédiment est ici uniquement composé d'éléments fins, silts et argiles, sous forme d'une solution visqueuse déposée en aplats. Sa rigidité initiale est de 5,60 $N.m^{-2}$ et sa viscosité de 0,0181 Pa.s.

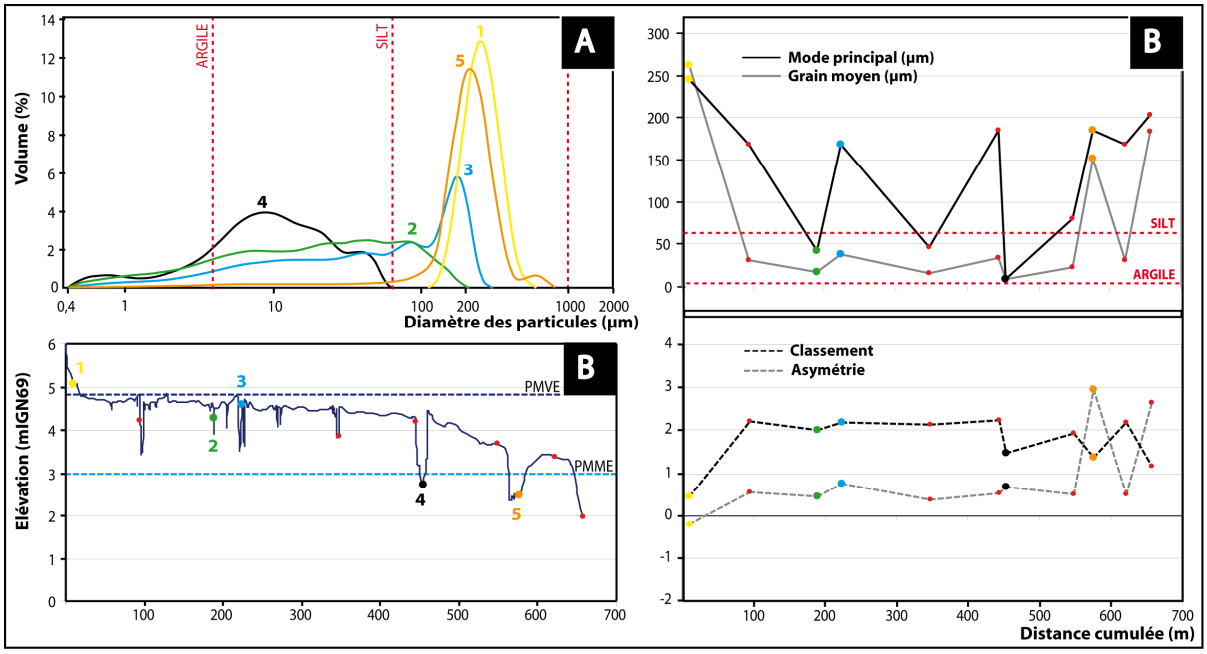


Figure 3.20. Granulométrie du profil P4
A. Courbes granulométriques représentatives du sédiment rencontré ; **C.** Localisation des stations ; **B.** Indices granulométriques.

Figure 3.20. *Grain-size along profile P4*
A. *Representative grain size curves of sampled sediments;* ***B.*** *Location of stations;*
C. *Grain-size parameters.*

La microtopographie des marais est dépendante du type de végétation en place. Des MNT ont été réalisés à l'aide des mesures des premiers relevés du RSET (Figure 3.21). Il s'avère que l'obione occasionne une plus grande densité de variations d'élévation que la puccinellie sur le schorre moyen avec des amplitudes cependant très faibles (2 à 2,5 cm). La microtopographie du bas schorre est ici influencée légèrement par la pente générale de la zone, la surface du substrat est plus lisse et semble donc peu perturbée par la spartine.

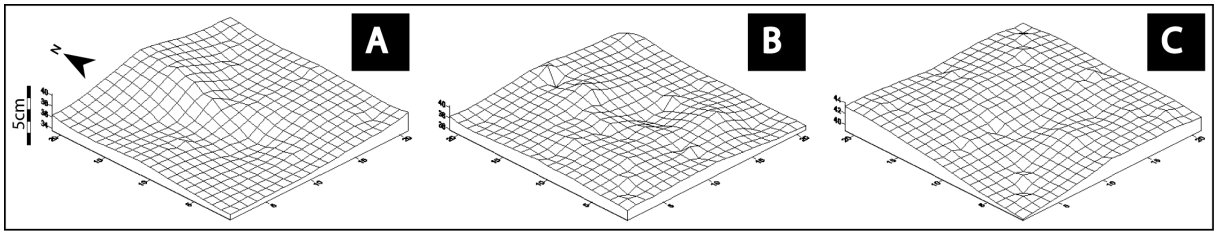


Figure 3.21. Microtopographie des marais selon le type de végétation
A. Spartine (Station P4_3) ; **B.** Obione (Station P4_5) ; **C.** Puccinellie (Station P2_5).

Figure 3.21. *Microtopography of salt marshes depending on vegetation type*
A. *Spartina (Station P4_3) ;* ***B.*** *Halimione (Station P4_5) ;* ***C.*** *Puccinellia (Station P2_5).*

En dehors des contraintes évoquées, les marais littoraux sont des milieux riches en éléments nutritifs et par conséquent très productifs. Les éléments nutritifs des marais sont exportés vers les masses d'eau et offrent ainsi une nourricerie à de nombreuses espèces qui viennent s'y alimenter et s'y reproduire (poissons plats, crevettes…). Les marais constituent également des espaces de repos pour les oiseaux, surtout lors de la période de migration. A ce titre, ils font partie intégrante des habitats côtiers d'intérêt communautaire au sens de la Directive « Habitats » et regroupent les associations végétales suivantes: végétations pionnières à Salicornia et autres espèces annuelles des zones boueuses et sableuses, prés à Spartina (*Spartinion maritimae*) et prés salés atlantiques (*Glauco-Puccinellietalia maritimae*). La carte phytosociologique la plus récente est présentée en Annexe III-1.

Spartina anglica est une espèces invasive *i.e.* une espèce non indigène à développement important qui peut se révéler dominante avec d'autres espèces pionnières telles que xxx et initier des changements d'habitat. Son installation peut provoquer des impacts écologiques et socio-économiques. Les premières observations de cette espèce dans les estuaires de la Somme, de l'Authie et de la Canche ont été faites respectivement en 1920 (Jacquet, 1949), 1933 (Corillion, 1936) et 1922 (Chevalier, 1923). La spartine anglaise *Spartina anglica* est une graminée issue d'une récente hybridation qui a eu lieu dans le sud de l'Angleterre en deux

étapes. La première est l'hybridation proprement dite en 1870 entre *Spartina maritima*, l'espèce locale et *Spartina alterniflora* en provenance d'Amérique du Nord. L'hybride *Spartina townsendii* était non fertile mais, en une seconde étape, a doublé son stock chromosomique et est devenu fertile, donnant *Spartina anglica* (Rauss, 2003). Il s'agit d'une espèce halophile pionnière qui s'installe dans les plus bas niveaux et se propage par des moyens sexués et asexués (Figure 3.16). Les taches pionnières se développent puis deviennent coalescentes et forment alors des prairies à spartines. La Spartine se propage dans la niche écologique qui lui est favorable mais on peut distinguer une phase d'invasion, suivie d'une phase de stabilisation et, dans certains cas, une phase de régression. Elle entre en compétition avec deux espèces pionnières indigènes : la salicorne *Salicornia sp* et *Spartina maritima*, espèce en très fort déclin. Dans les plus bas niveaux, elle entre en compétition avec les zostères. Différents essais de contrôle sur sa progression sont menés actuellement dans l'estuaire de la Somme. La lutte biologique s'est avérée peu efficace. Les herbicides donnent de bons résultats mais leur utilisation n'est pas forcément appréciée. Les interventions par fauche ou par rotavator demandent à être répétées et ne peuvent pas être réalisées à tous moment. Parmi les méthodes de lutte figurent également l'immersion par endiguage, le brûlage et les méthodes combinées, comme la chaux et le retournement. Il faut au préalable avoir bien défini des objectifs et agir en conséquence.

1.3.3. LES CHENAUX

De manière générale, les chenaux n'ont pas subi de grandes transformations anthropiques si l'ont prend en compte la partie non poldérisée de l'estuaire. Hormis une consolidation des berges du premier coude (Figure 3.22I), quelques aménagements ont quand même eu un rôle notable dans la position actuelle du chenal principal de l'Authie. Tout d'abord, la digue Barrois qui a fixé son installation médiane notamment dans sa partie centrale un peu en aval de la Madelon mais également au niveau de l'embouchure de l'estuaire où les différents épis repoussent son écoulement plus au large comme nous le verrons dans le Chapitre VI. Le chenal unique est mobile, il possède une largeur de 10 à 200 m, dont la position actuelle est contrôlée par l'accumulation sédimentaire à l'embouchure. Sa profondeur est de l'ordre de 3 m.

Les berges des chenaux de marée présentent une large gamme de caractéristiques morphologiques détaillées dans la figure 3.22. Suivant les caractéristiques lithologiques sur un profil vertical et la présence ou non de plantes halotolérantes de densités racinaires variables, les rives concaves des chenaux se révèlent plus ou moins sensibles à l'érosion.

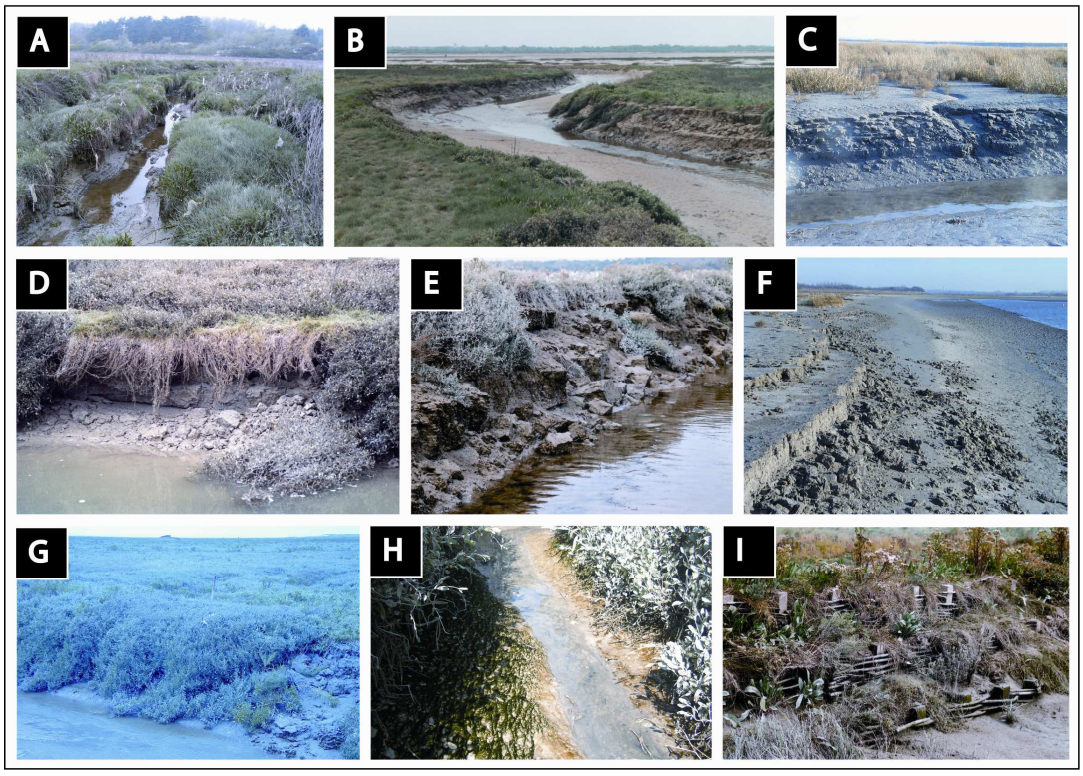


Figure 3.22. Quelques aspects morphologiques des berges de chenaux
A. Terrasses dans un chenal secondaire ; **B.** Détail d'un méandre présentant une berge convexe en accrétion et berge concave en érosion (microfalaise) ainsi que deux barres de méandre ; **C.** Microfalaise d'érosion ; **D.** Le réseau racinaire de la végétation consolide les berges ; **E.** Eboulement de blocs ; **F.** Morphologie en escalier due aux attaques érosives lors de différents niveaux de marée ; **G.** Stabilisation des berges par de l'Obione ; **H.** Stabilisation par un tapis d'algue verte ; **I.** Stabilisation artificielle par fascinage.

Figure 3.22. *Few morphological aspects of channel banks*
A. *Terraces in a secondary channel;* ***B.*** *Detail of a channel meander presenting one concave bank in accretion and one concave bank in erosion (microcliff), and two pint bars;* ***C.*** *Erosive microcliff ;* ***D.*** *Plant roots network and bank consolidation;* ***E.*** *Bloc eroded;* ***F.*** *"Steps" due to different tide levels erosion ;* ***G.*** *Stabilization of bank by Halimione ;* ***H.*** *Stabilization by algae;* ***I.*** *Artificial stabilization.*

La taille et la profondeur des chenaux varient aussi très fortement au sein de l'estuaire. Afin de décrire plus précisément leurs caractéristiques, différents paramètres ont été choisis. La classification de Strahler (Chapitre II) a été retenue afin de nommer chacun des drains, de leur tête (Figure 3.23B) à leur exutoire qui peut être soit un autre chenal de marée (Figure 3.23E) soit le chenal principal de l'Authie (on parle ici un peu de façon abusive d'exutoire

principal alors que selon la définition de Strahler on parlerait ainsi de l'exutoire de l'Authie *sensu stricto*).

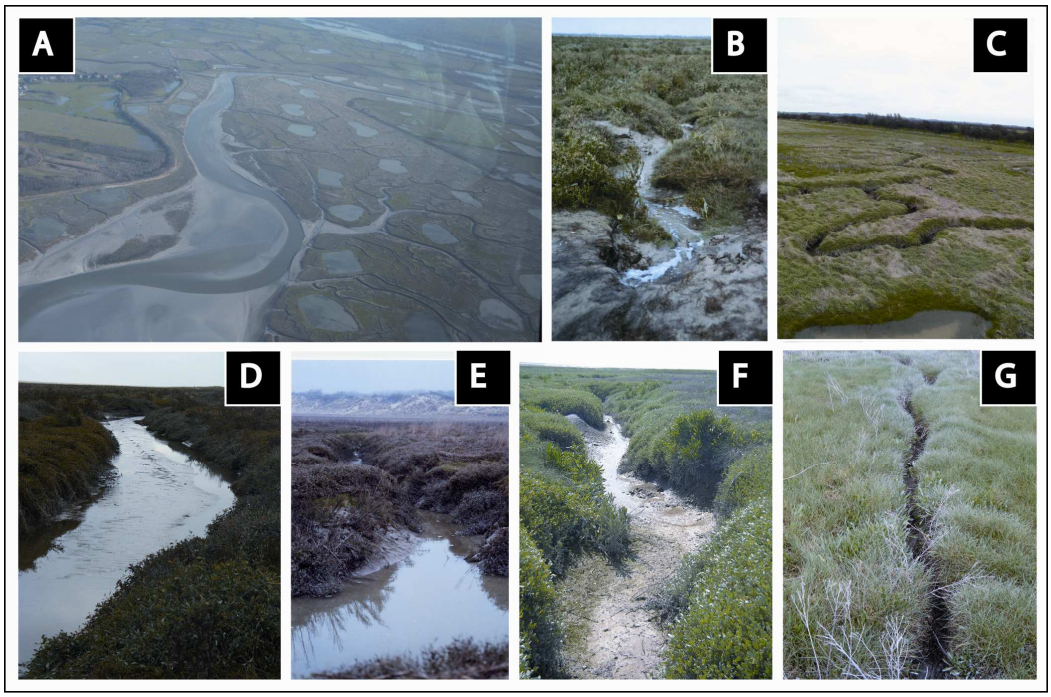


Figure 3.23. Chenaux de marée observés en Authie
A. Vue aérienne oblique du réseau de chenaux en rive Sud de l'estuaire (photo : D. Malengros); **B.** Tête d'un chenal ; **C.** Sinuosité du réseau de chenaux sur un marais mature (photo : A. Trentesaux); **D.** Chenal d'ordre supérieur; **E.** Embranchement entre deux chenaux ; **F.** Chenal d'ordre intermédiaire ; **G.** Chenal d'ordre inférieur avec ses levées.

Figure 3.23. *Tidal creeks in the Authie*
A. *Oblique aerial view of the creek network in southern bank of the estuary (picture : D. Malengros);* ***B.*** *Creek head;* ***C.*** *Sinuosity of creek network on a mature marsh (picture: A. Trentesaux);* ***D.*** *High order creek;* ***E.*** *Division between two creeks;* ***F.*** *Intermediate order creek;* ***G.*** *Low order creek with its levees.*

2. COMPORTEMENT DE LA HOULE ET SIGNATURE DE L'ONDE TIDALE A TRAVERS L'ESTUAIRE

Dans cette partie nous nous intéressons aux caractéristiques hydrodynamiques générales de l'estuaire. Le caractère ouvert ou abrité vis-à-vis des agents dynamiques peut être évalué à travers les enregistrements de houle. Le comportement spatio-temporel de l'onde tidale pénétrant dans l'estuaire pourra être analysé précisément. L'ensemble peut apporter un éclairage nécessaire à la compréhension de l'évolution morphosédimentaire du système.

Cette caractérisation a été menée avec des courantomètre-houlographes S4 ADW et ADCP au cours de différentes campagnes, après s'être assuré de la réponse corrélée des appareils aux mêmes acquisitions (Chapitre II), notamment lors des campagnes de Mai 2002 et de Février 2005. La localisation des appareils est présentée dans la Figure 3.24.

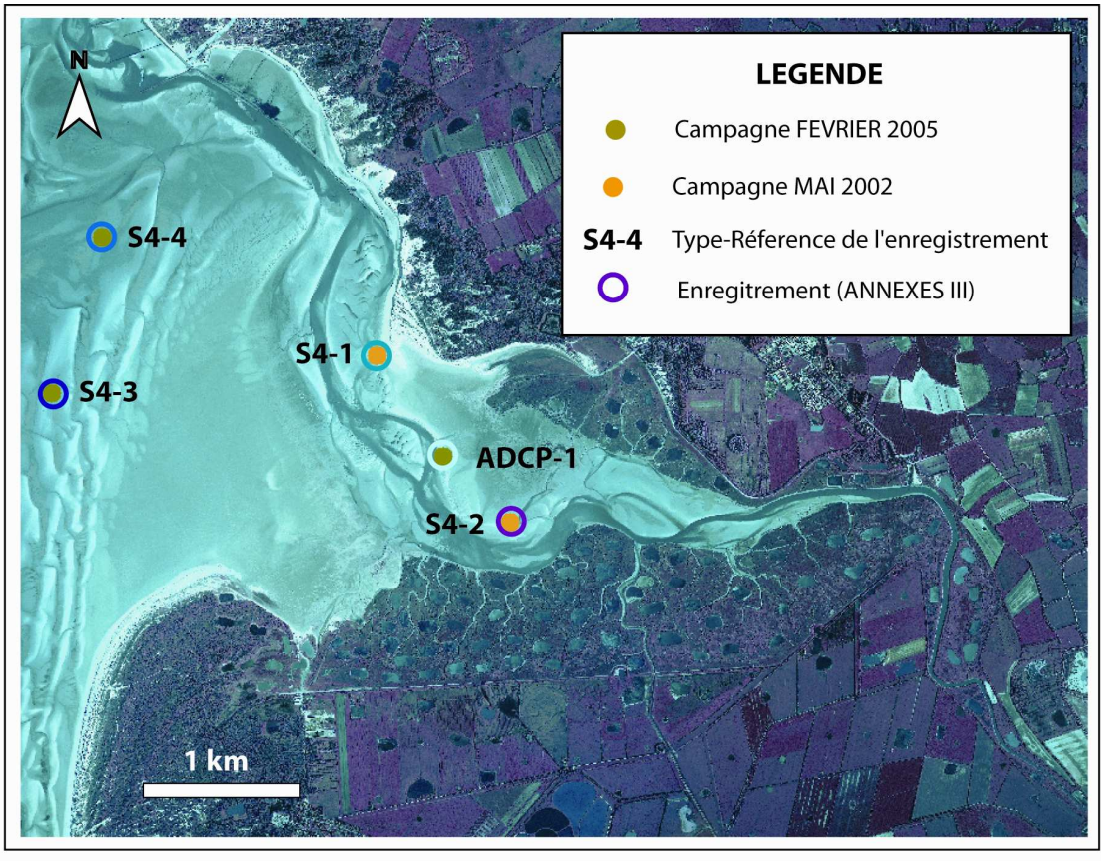


Figure 3.24. Carte des sites de mesure.

Figure 3.24. *Location of measurements sites.*

2.1. ETUDE DE LA HOULE

Cette analyse a été effectuée à partir des acquisitions de le la campagne de Février 2005. Les enregistrements des stations S4-3, S4-4 et ADCP-1 sont présentés respectivement en Annexes III-2 à 4 avec les données météorologiques tri-horaires observées à Berck (web WindGuru). Dans cette étude de la houle, nous avons choisi trois marées de cette campagne : la marée 1 (10/02/2005 AM, coefficient 108, marnage 9,32 m), la marée 9 (14/02/2005 PM, coefficient 69, marnage 7,45 m) et la marée 12 (16/02/2005 AM, coefficient 44, marnage 5,78 m) (Annexes III-2 à 4). La Figure 3.25 présente, pour les trois marées et les trois stations, les paramètres suivants : hauteur significative (Hs), période pic (Tp) et direction de la houle.

La première marée se caractérise par un vent de secteur Ouest-Sud Ouest et des vitesses relativement élevées entre 10 et 12 $m.s^{-1}$. On enregistre des hauteurs significatives de la houle à plus de 2 m pour les stations à l'embouchure alors que la station en domaine interne atteint à peine des Hs de 0,10 m. Les périodes pics sont comparables sur les deux premières stations avec des valeurs de 7 à 8 s. Pour la troisième station, on retrouve cette valeur de base de la période de la houle enregistrée sur les autres stations autour de l'étale de haute mer. Cependant sur le reste de la marée, cette période montre de très grandes variations. La houle vient d'un secteur Ouest à l'embouchure et d'un secteur Ouest-Sud Ouest plus à l'intérieur.

Lors de la marée 9 on observe des vents de secteur de secteur Nord-Nord Ouest de 9 à 13 $m.s^{-1}$. Les hauteurs significatives dépassent 1,5 m à l'embouchure mais la houle semble complètement dissipée plus à l'intérieur. Les périodes pics sont légèrement plus courtes que celles de la marée précédentes, cependant les valeurs enregistrées à l'intérieur et à l'extérieur de l'estuaire sont sensiblement les mêmes. Au cours du flot, on observe une réfraction importante de la houle dont la direction varie très fortement sur la station la plus interne avant de retrouver les valeurs observées à l'embouchure, soit entre 270 et 315° (Ouest-Nord Ouest).

Pendant la marée 12 des vents entre 7 et 9 $m.s^{-1}$ sont enregistrés en provenance du secteur Nord-Nord Est. La hauteur significative de la houle atteint 0,4 m à l'embouchure et présente des valeurs quasi nulles à l'intérieur. On observe des périodes pics comparables à celles observées lors des deux autres marée (entre 5 et 7 s) et la houle provient ici essentiellement du Nord-Ouest. Sur la station interne les périodes pics et la direction sont très perturbées sur l'ensemble de la marée.

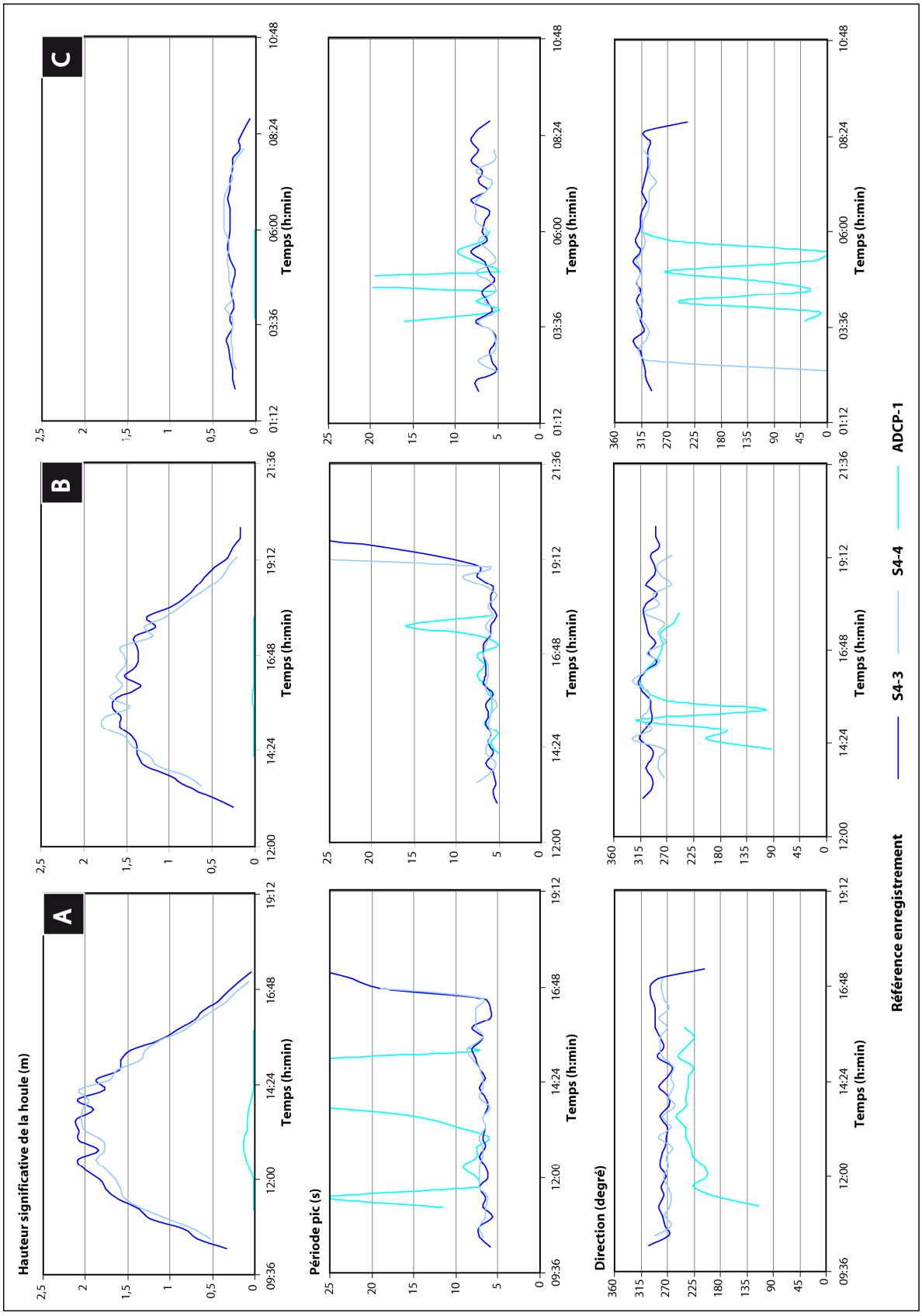


Figure 3.25. Paramètres de houle mesurés lors de la campagne de mai 2005.

Figure 3.25. *Wave parameters measured during the May 2005 field experiment.*

Ces périodes enregistrées correspondent à des fetchs intermédiaires et comportent des vagues courtes générées par des conditions météorologiques agitées du bassin réduit de la Manche et les houles plus longues provenant probablement de l'Atlantique. Cette étude confirme l'atténuation considérable de la houle qui entre dans le système estuarien. Cette atténuation semble être due à la présence des nombreux bancs intertidaux et à la morphologie de l'estuaire qui réfractent et dissipent de façon complexe les houles de la côte en se propageant vers l'intérieur de l'estuaire. Ainsi, peu après l'embouchure et ce pour des vents forts, l'action de la houle est totalement atténuée. La dynamique tidale est donc prépondérante dans le domaine estuarien interne où l'on retrouve notamment des dépôts caractéristiques de son action comme nous le verrons par la suite au cours des Chapitres V et VI.

2.2. ETUDE DE L'ONDE TIDALE

2.2.1. LE PRISME TIDAL

L'étude topographique fine présentée dans la première partie de ce chapitre nous a servi de base afin d'envisager une estimation du volume du prisme sédimentaire et donc du volume oscillant. Un premier calcul a été réalisé à partir des profils de section de l'estuaire. Une application plus complète devait être dédiée à la rive Nord grâce aux résultats altimétriques plus denses fourni par le LIDAR mais la précision insuffisante du capteur lors de l'acquisition ne nous a raisonnablement pas permis d'engager des calculs fiables (Chapitre II). Dans cette étude, l'estuaire est considéré comme un bassin tidal en raison du débit modéré de l'Authie et du régime mégatidal à son embouchure.

Nous avons tout d'abord étudié les sections de l'estuaire qui ont fait l'objet de relevés topographiques (Figure 3.6). Nous avons calculé les volumes du prisme sédimentaire pour chacune des sections d'après les données obtenues (Figure 3.26) et, en raison de lacunes au niveau du chenal, nous avons extrapolé ce profil à partir des observations de terrain (pente, concavité/convexité, microfalaise…) pour faire une estimation de ce même volume en prenant en compte les zones non couvertes. Le plancher a été fixé au niveau moyen de la marée soit 0,52 m et les volumes ont été calculés pour trois niveaux de marée : pleine mer de vives-eaux d'équinoxe, de vives-eaux et de mortes-eaux.

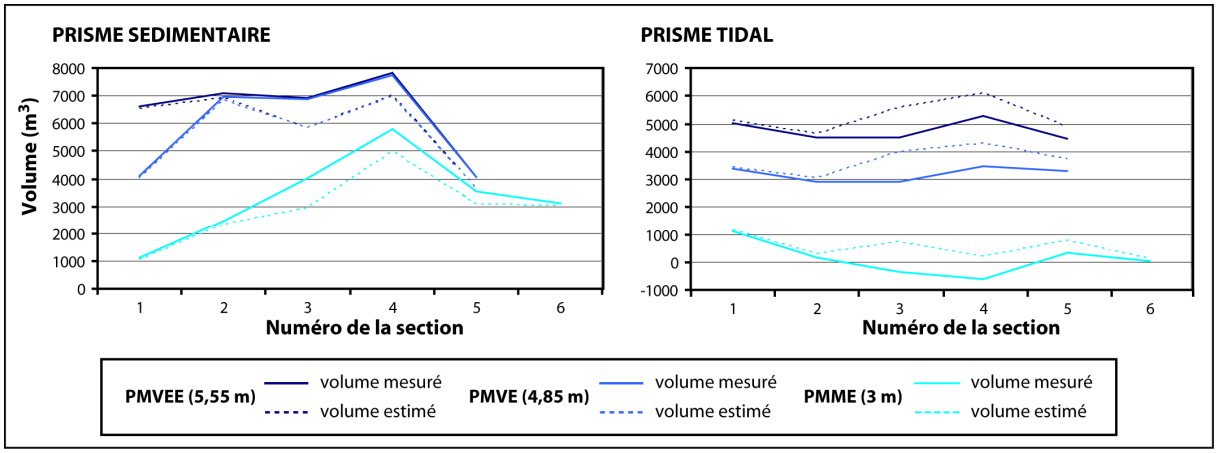


Figure 3.26. Volume des prismes sédimentaire et tidal (calculé et estimé) pour trois niveaux de marée selon différentes sections d'1 m.

Figure 3.26. *Sediment and tidal prism volumes (calculated and estimated) for three tide levels according to different 1 m sections.*

On peut observer une augmentation progressive du volume du prisme sédimentaire puis une diminution marquée sur les deux dernières sections qui correspond au rétrécissement notable de la section en fond d'estuaire. Le prisme tidal sur une section de 1 m a quant à lui été estimé à moins de 1000 m^3 pour les PMME, entre 3000 et 4000 m^3 pour les PMVE et entre 5000 et 6000 m^3 pour les PMVEE. Ramené à la distance entre l'embouchure et la Madelon, nous obtenons un prisme tidal de moins de $5{,}5.10^6$ m^3 pour les PMME, entre 16,5 et 22.10^6 m^3 pour les PMVE et entre 27,5 et 33.10^6 m^3 pour une PMVEE.

2.2.2. PROPAGATION DE L'ONDE TIDALE

Connaissant l'espace soumis à l'influence de la marée, nous essayerons ici de qualifier et quantifier le déplacement de ces masses d'eau à travers l'estuaire. Pour ceci, les enregistrements réalisés à 40 centimètres du substrat en bas d'estran (voire dans le chenal) à partir des courantomètres S4*ADW* et ADCP ont été retenus ainsi que les données courantométriques issues d'ADV à 10 cm du substrat en position plus haute sur l'estran. Dans un souci pédagogique, cette étude a été décomposée en trois parties suivant les unités estuariennes et les processus concernés.

Dans ce premier volet, nous avons voulu caractériser le comportement de l'onde tidale qui entre dans l'estuaire. Nous avons repris les marées précédemment décrites dans l'étude de la houle sur les trois sites, à savoir à l'embouchure à la fois au niveau de la base de la flèche sableuse (S4-3) et au niveau du débouché de l'Authie (S4-4), et à l'intérieur de l'estuaire (ADCP-1).

Les enregistrements réalisés sur la marée de plus fort marnage (1) sont présentés en Figure 3.27. On observe des hauteurs d'eau de 6 m lors de l'étale de haute mer à l'embouchure contre 4 m au niveau de l'estuaire interne. La marée verticale présente une symétrie presque parfaite quelles que soient les stations observées. On observe un décalage important entre la renverse des courants et la hauteur d'eau maximale. La renverse intervient à mi-jusant sur la station S4-3 puis juste après l'étale de haute mer sur la station S4-4 avant de se mettre en phase sur la station ADCP-1. Lors de cette renverse, les courants de marée ne s'annulent pas et restent assez intenses au niveau de la station la plus en aval (0,4 $m.s^{-1}$). Le courant de flot domine en intensité même si cette dominance est moins marquée avec une compétence accrue du jusant sur la station plus à l'intérieur. La composante principale du courant est l'axe Nord-Sud pour les deux stations les plus en aval, correspondant à un écoulement longitudinal, tandis que la station interne est gouvernée par un écoulement axial par rapport au chenal principal de l'Authie. On voit cependant que l'écoulement de la station intermédiaire subit l'influence de la proximité du chenal de l'Authie avec une accélération notable des vitesses transversales en début de flot.

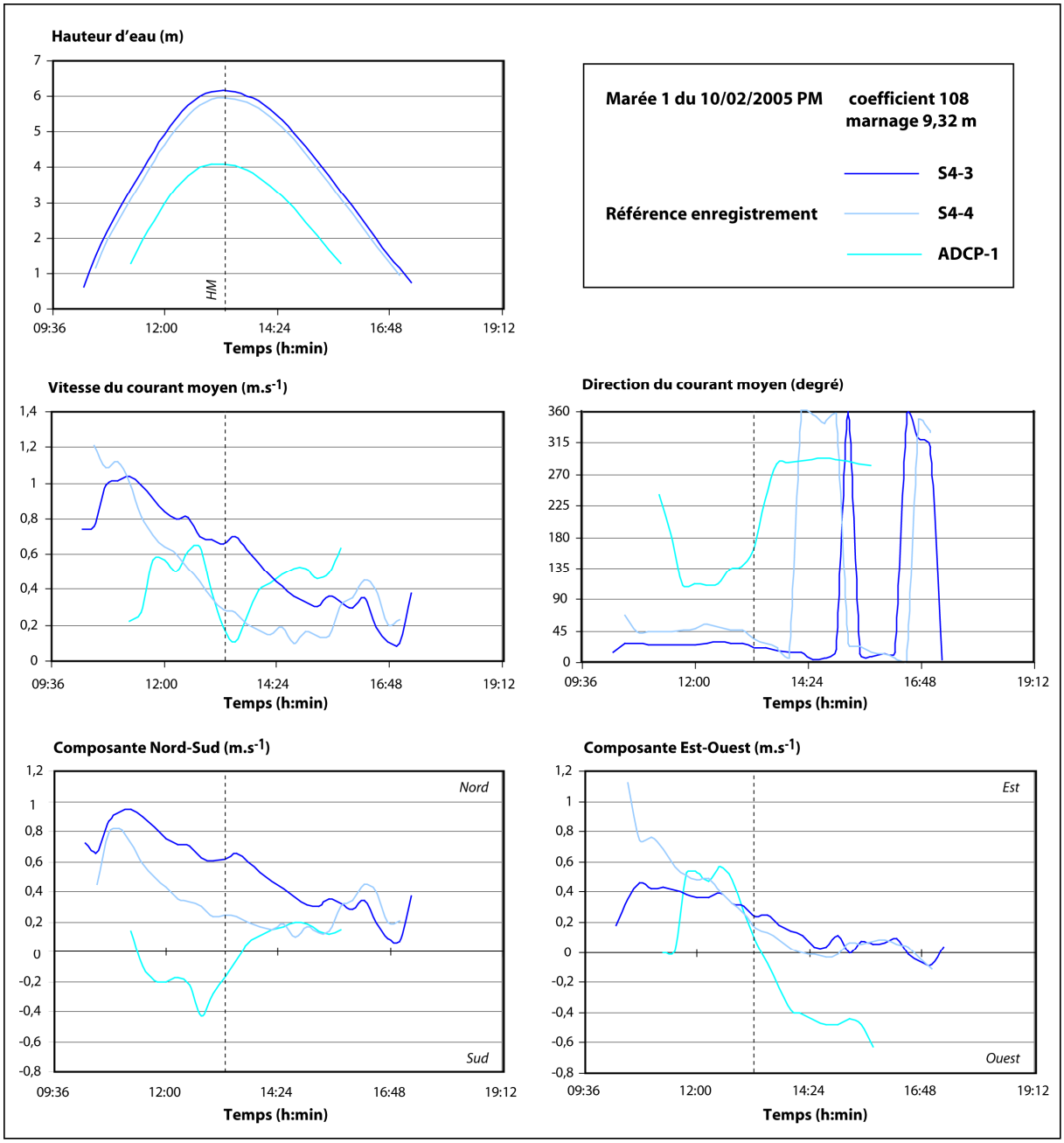


Figure 3.27. Paramètres des courants mesurés sur trois sites lors de la marée 1 (10/02/2005 AM, coefficient 108, marnage 9,32 m).

Figure 3.27. *Measured current parameters at three sites over tide 1 (10/02/2005 AM, tidal range 9.32 m).*

Les paramètres de la marée 9 sont regroupés en Figure 3.28. La marée verticale présente ici également une bonne symétrie entre les deux phases de la marée. Les niveaux d'eau de la station centrale montrent une différence plus grande avec la station amont. Le décalage entre l'étale de haute mer est plus faible que sur la marée 1 et mieux marquée par un affaiblissement des vitesses de courant. Les courants sont généralement moins forts que ceux précédemment observés, en corrélation avec l'amplitude tidale plus faible dans ce cas. La

dominance des courants de flot est également plus faible. Le gain d'intensité du jusant peut être relié à un forçage météorologique réalisé par le fort vent de secteur Nord-Nord Est. Cette action est également visible au niveau des directions du courant moyen lors du jusant qui portent plus à l'Ouest. Les vitesses observées en amont restent importantes et dirigées principalement selon une composante Est-Ouest.

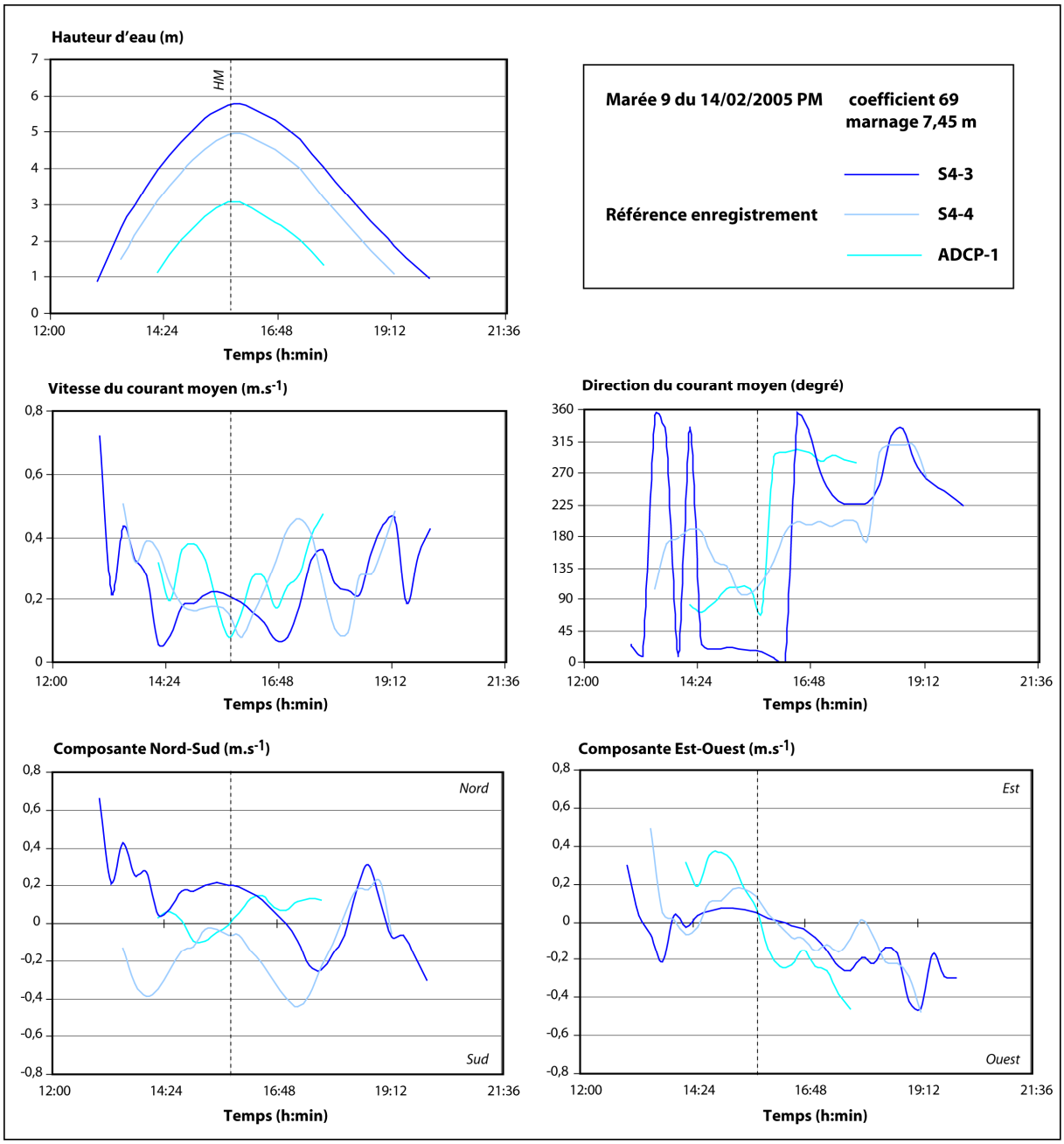


Figure 3.28. Paramètres des courants mesurés sur trois sites lors de la marée 9 (14/02/2005 PM, coefficient 69, marnage 7,45 m).

Figure 3.28. *Measured current parameters at three sites over tide 9 (14/02/2005 PM, tidal range 7.45 m).*

Sur la marée 12, on observe une asymétrie verticale de la marée en faveur du flot sur la station amont (Figure 3.29).

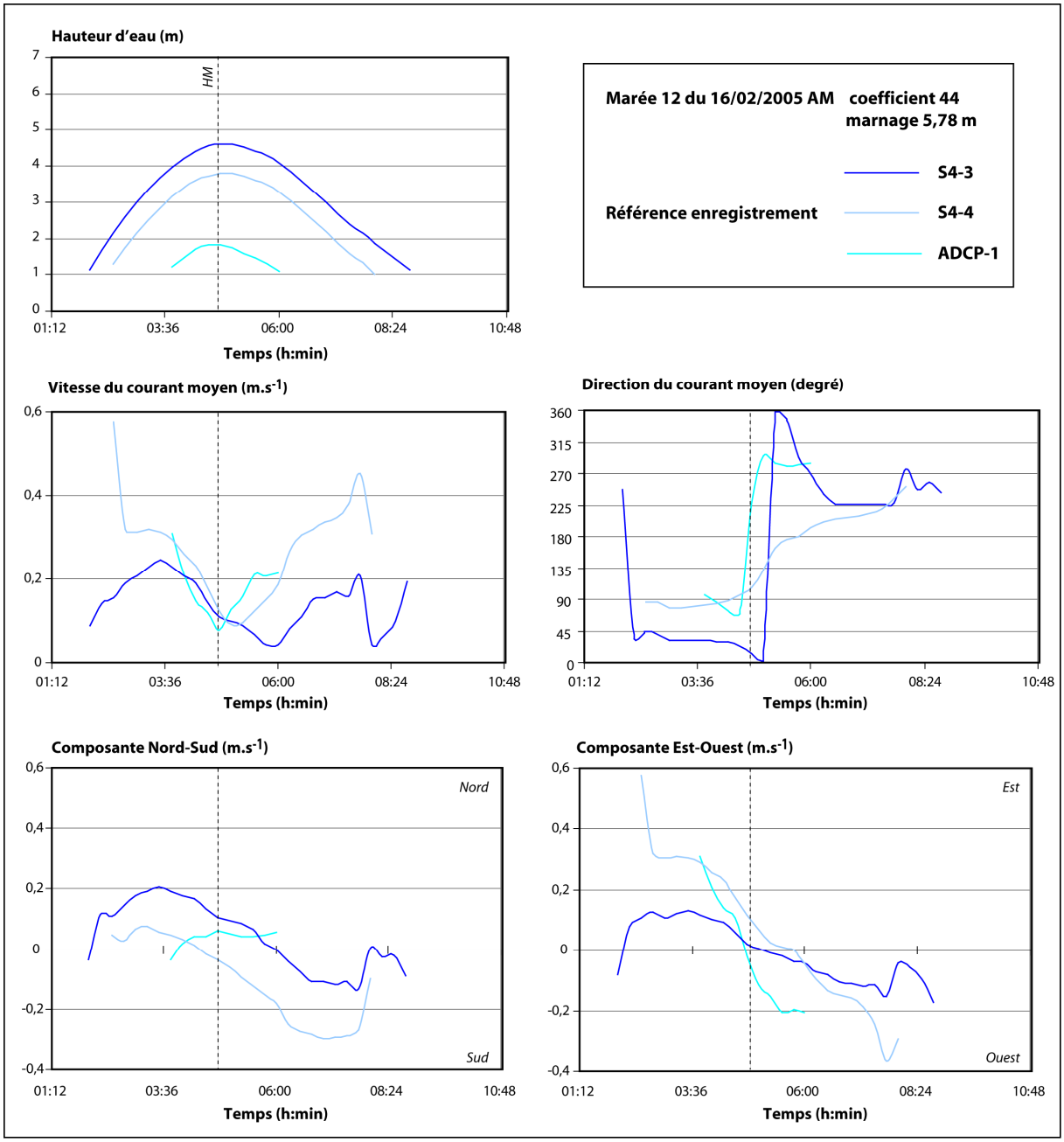


Figure 3.29. Paramètres des courants mesurés sur trois sites sur la marée 12 (16/02/2005 AM, coefficient 44, marnage 5,78 m).

Figure 3.29. *Measured current parameters at three sites over tide 12 (16/02/2005, tidal range 5.78 m).*

Les vitesses du courant moyen montrent une alternance claire des deux phases de la marée où le courant de flot domine cependant. D'un point de vue relatif, c'est l'enregistrement

intermédiaire qui montre les vitesses les plus importantes (jusqu'à trois fois supérieures à celles des autres stations) et dominées par la composante transversale, révélant ainsi le forçage topographique important du chenal. L'importance des vents de Nord-Nord Est semble profiter à une accélération des courants en fin de jusant en direction du Sud-Ouest.

Nous n'observons pas d'asymétrie verticale de la marée à l'embouchure bien que celle-ci puisse se manifester dans une moindre mesure plus en amont, dans le chenal en arrière de la flèche sableuse. L'amplitude des marées détermine en partie les vitesses de courant observées bien que deux forçages majeurs peuvent influencer à la fois l'intensité et la direction des courants : un premier lié à la topographie à travers l'encaissement du chenal principal de l'Authie et un deuxième dû aux conditions météorologiques *via* la force et le secteur d'approche des vents observés.

Dans un deuxième temps, nous avons essayé de caractériser plus précisément l'action de la marée dans le domaine estuarien interne. Pour cela nous avons retenu les deux enregistrements courantométriques S4-1 et S4-2 obtenus lors de la campagne de Mai 2002.

Les données courantométriques de la station S4-1 sont présentées en Annexe III-6. Située au niveau du Bec du Perroquet, en aval de seconde flèche sableuse et dans le chenal principal de l'Authie, cette station est atteinte par un flot orienté vers le sud à PM -1 h pour de faibles coefficients et dès PM -2 h pour des coefficients plus importants. L'intensité du flot devient rapidement maximale, sa vitesse est de 0,4 $m.s^{-1}$ pour un coefficient faible (marée 1) et atteint 1,8 $m.s^{-1}$ pour un fort coefficient (marée 15). Après une étale où les vitesses s'annulent, le jusant s'amorce dans une direction opposée. Sa durée est beaucoup plus longue et son intensité plus faible avec des vitesses de 0,4 et 0,5 $m.s^{-1}$.

Les données courantométriques de la station S4-2 sont présentées en Annexe III-7. Cette station, située près du chenal à l'autre extrémité de la plate-forme sablo-vaseuse, est atteinte par le flot à PM -1h30. Le flot est orienté vers l'est. La dominance du flot est moins marquée mais les pics de vitesses sont très élevés : 0,5 $m.s^{-1}$ pour un faible coefficient (marée 5) et 1,4 $m.s^{-1}$ pour une fort coefficient (marée 9). A l'étale, les vitesses sont presque nulles et les courants changent brutalement de direction vers le sud puis vers l'est. Au jusant, les vitesses sont maximales à PM+2h avec des vitesses respectives de 0,3 $m.s^{-1}$ et de 1 $m.s^{-1}$.

Les enregistrements courantométriques obtenus en S4-1 et S4-2 montrent une forte canalisation des courants de marée réalisée par le chenal principal avec un écoulement axial dominant, orienté respectivement vers le Sud au flot puis vers le Nord au jusant en S4-1, et

vers l'Est puis l'Ouest en S4-2 (Figure 3.30). L'orientation des courants de marée est donc principalement due au forçage topographique important. L'intensité des courants augmente quand le marnage est plus important. Les résultats dans ce secteur montrent aussi une nette dominance des courants de flot, de plus faible durée mais de plus grande intensité que ceux du jusant. La présence de mégarides et l'orientation de leurs crêtes au niveau du site S4-1 attestent notamment de ce fort hydrodynamisme.

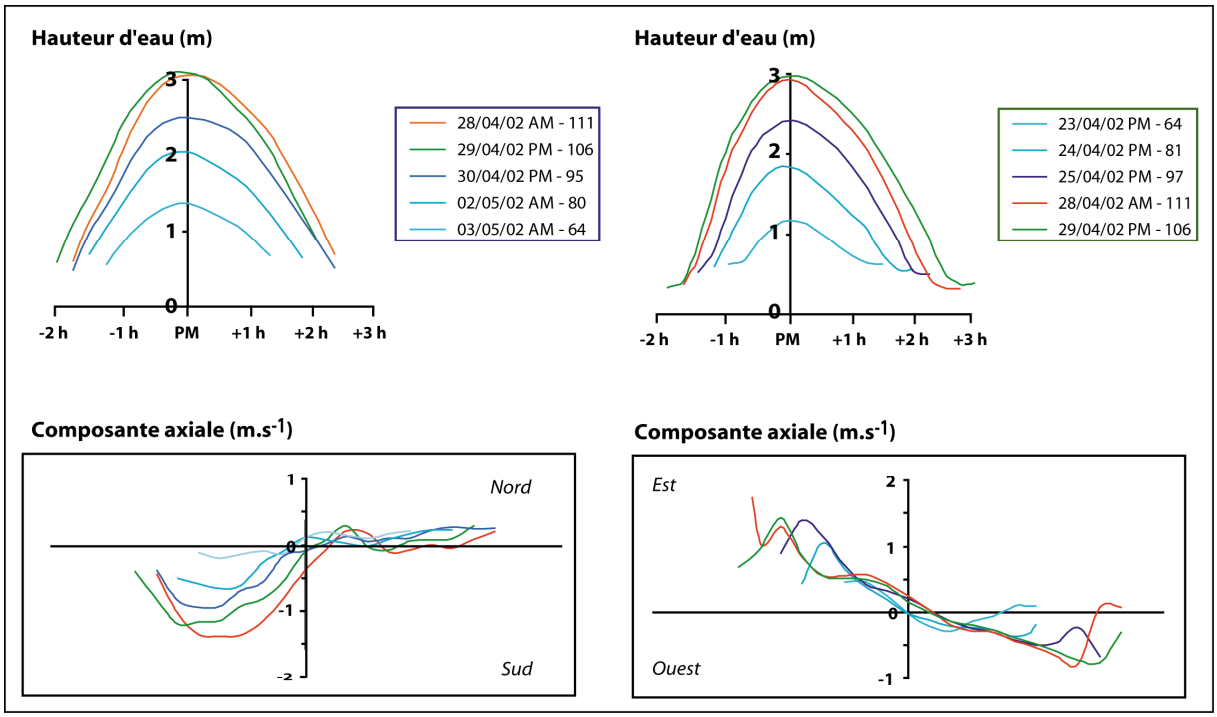


Figure 3.30. Hauteur d'eau et composante axiale des courants de marée pour les stations S4-1 (à gauche) et S4-2 (à droite) sur une partie du cycle semi-lunaire.

Figure 3.30. *Water level and axial component of tidal currents for station S4-1 (on the right) and S4-2 (on the right) over a part of a semi-lunar cycle.*

Cette asymétrie verticale en faveur du flot semble plus marquée sur le site S4-2 où la durée du jusant s'allonge considérablement. En revanche, l'intensité des courants de jusant y concurrence presque celle des courants de flot. Les résultats obtenus lors de la marée du 29/04/2002 montrent également un renforcement des courants de marée et une légère surcote en relation avec un forçage météorologique (fort vent de Sud-Ouest). Cette asymétrie de la marée est favorable à un transport résiduel des sédiments vers l'intérieur de l'estuaire, comme l'ont confirmé des travaux antérieurs grâce à l'utilisation de traceurs colorés sur les estrans à l'embouchure (Anthony *et al*, 2001).

La translation verticale de la marée est donc caractérisée par une asymétrie positive avec une montée rapide du niveau d'eau pendant le flot suivie d'une diminution lente lors du jusant. Cette asymétrie est attribuée à la troncation de l'étale de masse mer due à la présence d'un palier naturel à l'embouchure de l'estuaire (Lessa et Masselink, 1995). Cette asymétrie augmente avec le marnage et suggère que la morphodynamique estuarienne est gouvernée par des courants dominés par le flot qui favorisent un transport de sédiment préférentiel vers l'amont.

Afin de vérifier le comportement de la marée sur les zones de plus hauts niveaux altimétriques, nous avons placé un ADV sur l'estran en position intermédiaire sur la même campagne. Les résultats sur deux marées sont présentés en Figure 3.31.

Lors de la marée du 25/04/2002 (coefficient 90), le flot atteint cette station à PM -1 h à une vitesse de 0,4 $m.s^{-1}$ et s'oriente vers le nord-est, la composante est étant prédominante. A l'étale de pleine mer, les vitesses s'annulent et les courants s'orientent ensuite selon une composante sud-ouest. La vitesse du courant est alors de 0,2 $m.s^{-1}$ vers l'ouest. A mi-jusant, les vitesses s'annulent de nouveau avant d'atteindre rapidement 0,3 $m.s^{-1}$ vers l'ouest contre 0,1 $m.s^{-1}$ vers le sud. Cet appareil nous permet également d'appréhender les tendances du courant selon une composante verticale. Au début du flot, le courant est dirigé vers la surface de l'eau et une vitesse de 0,04 $m.s^{-1}$ est alors mesurée. La vitesse du courant s'annule un peu avant l'étale de pleine mer puis oscille autour de 0,01 $m.s^{-1}$ jusqu'à la mi-jusant avant de présenter un nouveau pic à 0,01 $m.s^{-1}$ et de s'engager brutalement en direction du substrat à une vitesse de 0,02 $m.s^{-1}$. L'asymétrie est également en faveur du flot avec un jusant plus long et présentant de plus faibles vitesses.

Lors de la marée du 28/04/2002, on observe les mêmes tendances dans les directions de courants. Cependant, l'asymétrie verticale en faveur du flot est moins marquée et l'asymétrie horizontale est ici clairement en faveur du jusant. Lessa et Masselink (1995) ont suggéré que l'asymétrie tidale ne prévaux pas toujours quels que soient les marées étudiées et l'emplacement des acquisitions. Lors des coefficients très importants, la vidange des hauts niveaux en fin de marée peut occasionner des courants bien plus intenses lors du jusant. Bien que cette proportion de cycles tidaux soit limitée, l'estuaire peut dans certains cas être dominé par le jusant sur une base annuelle.

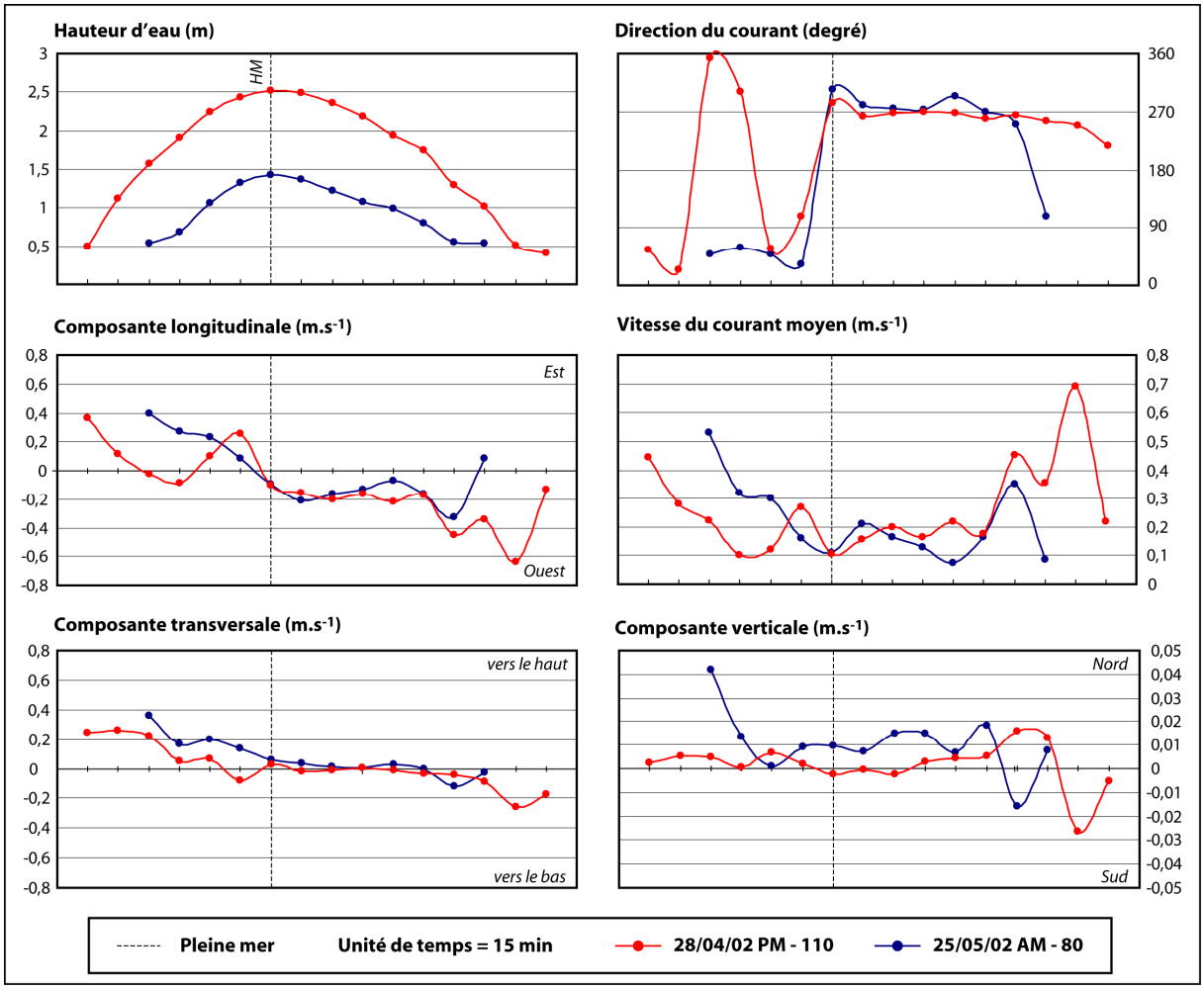


Figure 3.31. Paramètres des courants mesurés sur la partie supérieure de l'estran à la transition entre les stocks vaseux et sableux lors de deux marées (28/04/2002 PM, coefficient 110, marnage 9,42 m ; 25/04/2002 AM, coefficient 80, marnage 7,71 m).

Figure 3.31. *Measured current parameters in the upper part of the tidal flat at the transition between sand and mud for two tides (28/04/2002 PM, tidal range 9.42 m; 25/04/2002 AM, tidal range 7.71 m).*

Afin de vérifier ce que ce type d'asymétrie pouvait engendrer en terme de transport résiduel à ces niveaux, nous avons réalisé un échantillonnage de la totalité de la plate-forme sablo-vaseuse à l'arrière de la seconde flèche sableuse interne. Les prélèvements de sédiments ont été effectués sur l'estran le 25/04/2002 (coefficient 90, marnage 8,22 m) sur environ 10 cm d'épaisseur correspondant approximativement à l'épaisseur de remaniement des sédiments (Pedreros *et al.*, 1996). Au total, 102 stations ont été échantillonnées de façon systématique selon un maillage quasi-hexagonal de 75 m de côté (Figure 3.32).

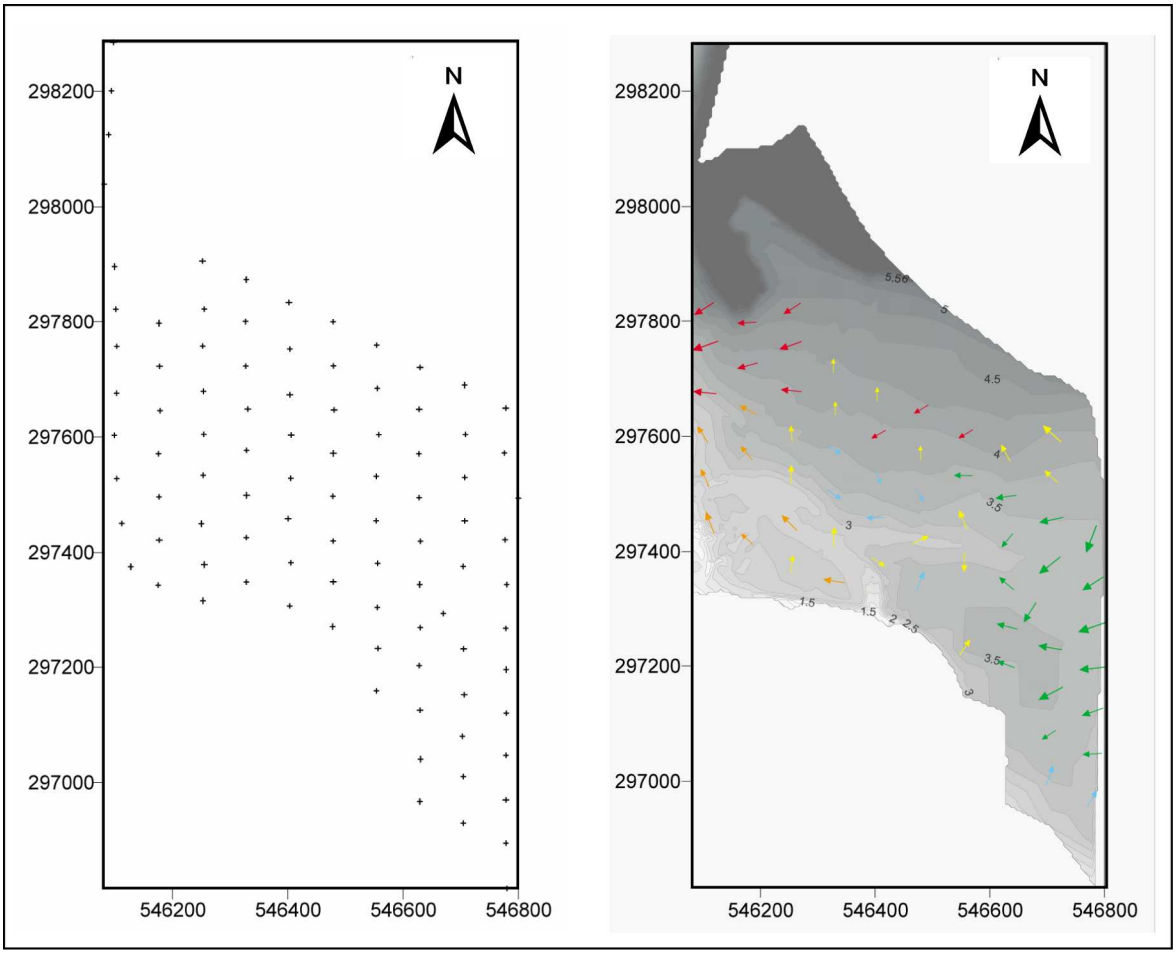


Figure 3.32. Grille d'échantillonnage des sédiments et résultats obtenu avec GSTA.

Figure 3.32. *Sediment sampling grid and results from GSTA.*

La carte finale (Figure 3.32) établie en appliquant la filtration semi-quantitative de Gao et Collins (1992) sur les paramètres calculés (grain moyen, tri et asymétrie) grâce au programme Fortran GSTA « Grain Size Trend Analysis » (Gao, 1996) nous permet d'obtenir les tendances du transport sédimentaire qui a lieu dans cette zone sur le laps de temps pris en compte par l'épaisseur de sédiment échantillonné. Cette carte représente les directions de transport sédimentaire potentiel dans laquelle la probabilité de transport entre deux points est proportionnelle à la longueur du vecteur résiduel. Deux voies principales de transport semblent se dégager : en direction du chenal à l'ouest où la pente de la plate-forme est la plus importante et du schorre vers la plate-forme. La zone intermédiaire entre ces deux zones est moins nette avec cependant une tendance vers le chenal principal en empruntant le chenal secondaire que l'on visualise aisément grâce à la carte topographique. Les directions en bas de plate-forme sont plus difficiles à définir et semblent être perturbées par la présence de ce

dernier. Cependant, on peut observer des vecteurs témoignant d'un transport orienté vers l'aval.

La méthode de Gao et Collins (1992) a été essentiellement appliquée en milieu littoral, et plus récemment sur les fonds estuariens (Erhold, 1999) et en zone intertidale (Pedreros *et al*, 1996 ; Sedrati, 2006), afin de mettre en évidence un transport sableux sous l'action d'agents de transport sélectif. Le choix de son utilisation sur notre site se justifie en raison de la faible présence de vase dans nos prélèvements et de la présence de tels agents dynamiques. En effet, notre zone d'étude est à la fois soumise à l'influence du vent quand elle est découverte par la marée et à celle des courants de marée quand elle est immergée. De façon générale, le sédiment s'affine dans le sens du transport sous l'action éolienne et devient plus fin ou plus grossier quand il est transporté par les courants tidaux. Le calcul des indices granulométriques a été effectué sur la composition totale des échantillons, la fraction fine n'ayant pas été exclue contrairement à certaines études mentionnées. Erhold (1996) mentionne d'ailleurs que l'augmentation de la précision du modèle de transport résiduel liée à la considération de la combinaison des deux cas (davantage de vecteurs unitaires étant initialement définis) est surtout respectée si l'on travaille de cette façon. La carte finale présente une idée statistique des tendances de transport. Celle-ci met en évidence l'existence d'un transport vers l'amont principalement le long des lignes de dénivelé sur la plate-forme, puis vers le chenal en suivant la pente la plus forte et du schorre à la plate-forme. La direction des vecteurs orientés vers l'Ouest sur le haut de la plate-forme semble conforme aux directions des courants de jusant enregistrées par le courantomètre ADV installé en son centre. Nous avons voulu déterminer le transport réalisé par le jusant. Or, cette technique considère les directions résiduelles du dernier transport sédimentaire réalisé. Aussi les vecteurs dirigés vers le nord peuvent peut-être mis en relation avec un transport éolien postérieur au jusant pour les stations situées en haut de notre zone ou en hauteur sur la plate-forme. Sur les stations plus basses, ces mêmes directions traduiraient l'influence prépondérante des courants de flot et le manque de compétence des courants de jusant qui ne remanieraient pas suffisamment le sédiment. Le pas de temps pris en compte dépend étroitement de la profondeur de sédiment échantillonné. La profondeur d'échantillonnage ne serait alors pas appropriée à cette partie de l'estran. L'utilisation de traceurs fluorescents (Pedreros *et al*, 2000) permettrait de prendre en compte cette variation spatiale de l'épaisseur de remaniement et d'ajuster notre échantillonnage.

2.3. INTERACTIONS ENTRE MORPHOLOGIE ET ASYMETRIE TIDALE

La marée verticale est dominée par le flot lorsque la marée montante est plus courte que la marée descendante. Elle est dominée par le jusant quand l'inverse est vrai. Dans les estuaires régis par la dynamique tidale, cette asymétrie contrôle les échanges entre les différentes unités (Wang *et al*., 2002) et à un impact sur le transport résiduel des sédiments fins (e.g. Postma, 1967 ; Groen, 1967 ; Dronkers, 1985, 1986; Ridderinkhof, 1997; Schuttelaars et De Swart, 2000) ou plus grossiers (e.g. Aubrey, 1986; Dronkers, 1986; Friedrichs et Aubrey, 1988; Van de Kreeke et Robaczewska, 1993; Van de Kreeke et Dunsbergen, 2000).

La morphologie estuarienne est dans une large mesure déterminée par le transport sédimentaire résiduel. Cependant, le constat inverse est également observé. Le transport sédimentaire résiduel dépend des différences de magnitude et de durée entre les courants de flot et de jusant. Ces différences (*i.e.* l'asymétrie tidale) sont produites par la distorsion de l'onde tidale lors de sa propagation à travers l'estuaire (Dronkers, 1986). L'asymétrie de la marée est un des principaux facteurs contrôlant le transport résiduel de sédiment et donc l'évolution de la morphologie dans les estuaires et les bassins tidaux (Aubrey, 1986; Dronkers, 1986). L'interaction entre la morphologie, l'asymétrie tidale et le transport résiduel est résumée en Figure 3.33.

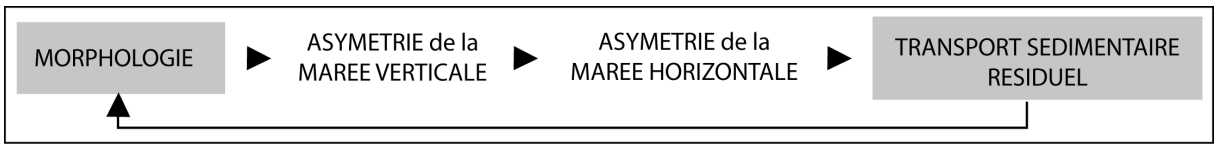


Figure 3.33. Interactions entre la morphologie et l'asymétrie tidale (Wang *et al*., 2002).

Figure 3.33. *Interactions between morphology and tidal asymmetry (Wang et al., 2002).*

Différents aspects de ces interactions ont déjà été décrits précédemment dans la littérature spécialement pour de petits bassins. De nombreux auteurs considèrent l'influence de la morphologie du bassin sur l'asymétrie de la marée verticale et horizontale (Boon et Byrne, 1981 ; Speer et Aubrey, 1985 ; Friedrichs et Aubrey, 1988, 1994 ; Dronkers, 1986, 1998 ; Speer *et al.*, 1991 ; Friedrichs *et al.*,1992 ; Van der Spek, 1997 ; Lanzoni et Seminara, 1998). Ils ont démontré que la profondeur moyenne d'une part et le volume relatif et l'altimétrie des estrans d'autre part affectent l'asymétrie. Ainsi, les bassins peu profonds avec une grande capacité de stockage intertidale tendent à être dominés par le flot et à engendrer un

transport sédimentaire de fond vers la tête de l'estuaire tandis que les bassins profonds avec une capacité moindre de stockage sur les aires intertidales tendent à être dominés par le jusant.

CONCLUSION

Les descriptions des caractéristiques morphologiques et sédimentaires des différentes parties de l'estuaire mettent en évidence des unités morpho-sédimentaires bien différenciées le long de gradients longitudinaux et transversaux marqués. Les surfaces envasées présentent une grande variété d'établissements topographiques, sur les hauts niveaux ou au fond des chenaux où les particules fines sédimentent brutalement lors du retrait de la marée. L'étude topographique fine permet de constater les différents stades d'évolution notamment à travers les particularités du réseau de chenaux de marée.

Les études hydrodynamiques attestent d'une atténuation totale de la houle à l'intérieur de l'estuaire et d'une action tidale intense. Les conditions météorologiques et la topographie sont les principaux forçages mis en évidence par les enregistrements. On observe une domination de la marée verticale par le flot favorable à un transport préférentiel des sédiments vers l'amont. Cependant, les effets de vidange des masses d'eau importantes lors des grandes marées sont susceptibles d'entraîner épisodiquement une asymétrie horizontale en faveur du jusant.

L'évolution des bassins tidaux dépend étroitement de l'interaction entre la marée et la morphologie à travers la déformation de l'onde tidale qui peut occasionner des changements de l'écoulement des masses d'eau et donc du transport net de sédiment résultant. Cependant ces déformations sont très complexes et ne peuvent être donc déduites à priori à partir de la morphologie même si le bassin tidal est de taille raisonnable (Van der Spek, 1997).

INTRODUCTION

La dynamique des sédiments fins et des MES en milieu estuarien est particulièrement complexe et liée très étroitement à l'hydrologie (interaction eau douce/eau salée) et au régime hydrodynamique. Les études sur des échelles de temps courtes permettent l'acquisition simultanée et ponctuelle de données sur de plus nombreux paramètres et ainsi de caractériser plus finement les MES et leur flux dans la colonne d'eau.

Différentes expérimentations ont été menées afin de cerner le comportement hydrologique de l'estuaire et de mesurer une partie de la multitude des caractéristiques physiques des MES en transit dans les masses d'eau : taille, forme et concentrations (optiques, volumétriques et pondérales). Leur distribution dans l'espace et dans le temps sera également appréhendée grâce au type d'instrument déployé. Pour cela, différentes techniques ont été utilisées (Figure 4.1) et leurs résultats respectifs ainsi que l'éclairage qu'ils apportent sur la dynamique sédimentaire seront ensuite discutés. Des mesures courantométriques compléteront ces données et permettront de définir des conditions d'agitation qui régissent les principaux processus, remise en suspension et floculation.



Figure 4.1. Co-déploiement et acquisitions multi-paramétriques.
Figure 4.1. *Co-deployment and multi-parametric acquisitions.*

1. HYDROLOGIE GENERALE

1.1. DONNEES EXISTANTES

Plusieurs études ont été réalisées sur les masses d'eau de l'Authie et ce notamment dans son chenal principal en raison de sa meilleure accessibilité et de l'intérêt de caractériser son fonctionnement hydrologique. Ces analyses ont été le plus souvent périodiques (Bentley

et Orange, 1984 ; GEMEL, 1999 ; Dobroniak, 2000) mais également organisées en suivi sur plusieurs cycles grâce au travail du laboratoire de Chimie Analytique (Lahaye, 2001) qui a également permis la quantification de paramètres physico-chimiques complémentaires (Gabelle, 2002 ; Luddens, 2003). Selon ces différentes études dont les prélèvements ont été effectués dans le chenal principal de l'Authie (à la Madelon et aux Sternes, à l'embouchure), il n'y a pas de stratification saline de la colonne d'eau au cours du cycle tidal. De manière générale, à l'étale de basse mer, la stratification est quasi-nulle (0,5-0,6) pour les eaux de surface et de fond. A BM +2 h la salinité apparaît avant de décroître progressivement lors du jusant où elle retrouve les valeurs de départ vers BM +7 h. La salinité observée est proportionnelle au marnage en réponse au brassage des eaux douces et salées.

1.2. MESURES IN SITU

1.2.1. CHENAL PRINCIPAL

Des mesures complémentaires sur la salinité et la turbidité associées des masses d'eau ont été réalisées sur le chenal principal de l'Authie à la Madelon, site référence, sur une marée de vives-eaux et une autre de mortes-eaux (Figure 4.2). Les mesures sont effectuées sur trois niveaux qui sont déterminés suivant la hauteur d'eau présumée du site à l'étale de haute mer. Ainsi, nous avons réglé une station de pompage pour des prélèvements à 10, 35 et 60 cm du substrat et une autre à 10, 50 et 100 cm. On peut observer qu'une marée moyenne de mortes-eaux avec un marnage théorique à l'embouchure de 6,38 m engendre un maximum de salinité de 7 $g.l^{-1}$ alors que celle de vives-eaux de marnage 8,29 m occasionne une salinité maximale de 30 $g.l^{-1}$ mais également une légère stratification saline au début du flot et à la moitié du jusant entre les deux premiers points de mesure à 10 et 35 cm et le dernier à 60 cm. Concernant la turbidité, elle se situe autour de 50 $mg.l^{-1}$ au fond (10 cm) avant l'arrivée de la marée dans les deux contextes. Pendant la marée, la concentration de base en MES est moins élevée en mortes-eaux qu'en vives-eaux avec 50 contre 100 $mg.l^{-1}$. Sur la marée de vives eaux, la concentration de MES à 10 cm se détache très clairement des deux autres niveaux avec des valeurs deux fois supérieures, atteignant jusqu'à 500 $mg.l^{-1}$ mais les variations enregistrées sont toutefois comparables sur les trois hauteurs de mesures à l'exception d'un pic de turbidité plus prononcé au fond en fin de marée. Sur la marée de mortes-eaux, les concentrations de MES se distribuent assez différemment avec une diminution globale au

cours de la marée malgré deux maxima de 425 et 300 mg.l^{-1} au fond respectivement au début du flot et au milieu du jusant avec une salinité quasi nulle et s'élevant à 5 g.l^{-1}.

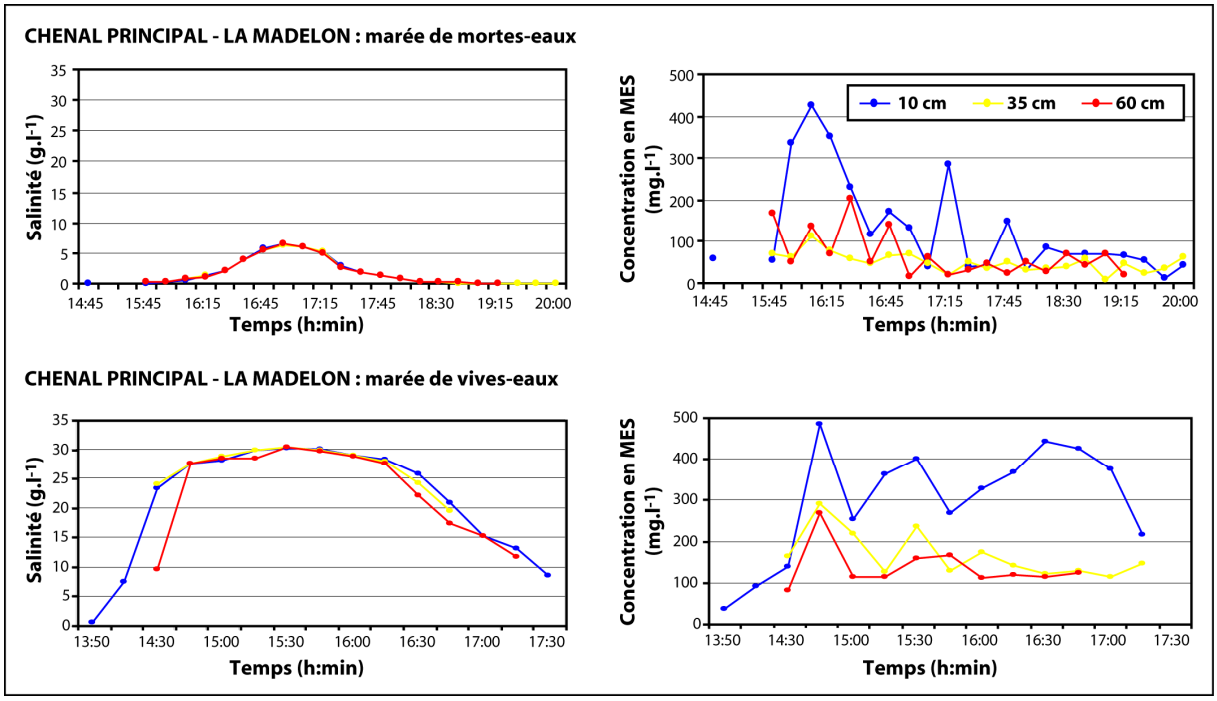


Figure 4.2. Salinité et concentration en MES mesurées dans le chenal principal de l'Authie sur le site de la Madelon (référence) pendant une marée de mortes eaux (marée du 21/05/2003, coefficient 64, marnage = 6,38 m) et de vives-eaux (marée du 19/05/2003, coefficient 92, marnage = 8,29 m).

Figure 4.2. *Salinity and SPM concentration measured in the main channel of the Authie in la Madelon site (reference) over a neap (21/05/2003, tidal range = 6.38 m) and a spring tide (19/05/2003, tidal range = 8.29 m).*

Nous avons ensuite réalisé de nouvelles mesures sur deux points du chenal principal simultanément sur une marée d'équinoxe avec un marnage théorique de 8,92 m (Figure 4.3). La première station est celle de la Madelon (référence) et la deuxième se situe à 4,1 km en amont après la première boucle que dessine le chenal contraint par deux digues. On n'observe pas de stratification quel que soit le site et le maximum de salinité est de 34 g.l^{-1} à la Madelon tandis qu'il n'atteint que 10 g.l^{-1} à Pont à Cailloux.

Sur le site de référence, on observe également une co-évolution temporelle de la turbidité sur cette fois-ci sur le premier mètre de la masse d'eau mais ici les différences entre les mesures au fond et les deux autres niveaux sont moins marquées. Entre 50 et 60 cm, les concentrations en MES varient globalement entre 100 et 200 mg.l^{-1} (maximum à 275 mg.l^{-1}) tandis qu'à 10 cm elles atteignent 375 mg.l^{-1}. Plus en amont, les concentrations suivent des variations identiques sur les soixante premiers centimètres avec deux pics bien dessinés au flot et au

jusant (300 et 125 mg.l^{-1}) ainsi qu'un retour au niveau de turbidité de base à l'étale de pleine mer (50 mg.l^{-1}).

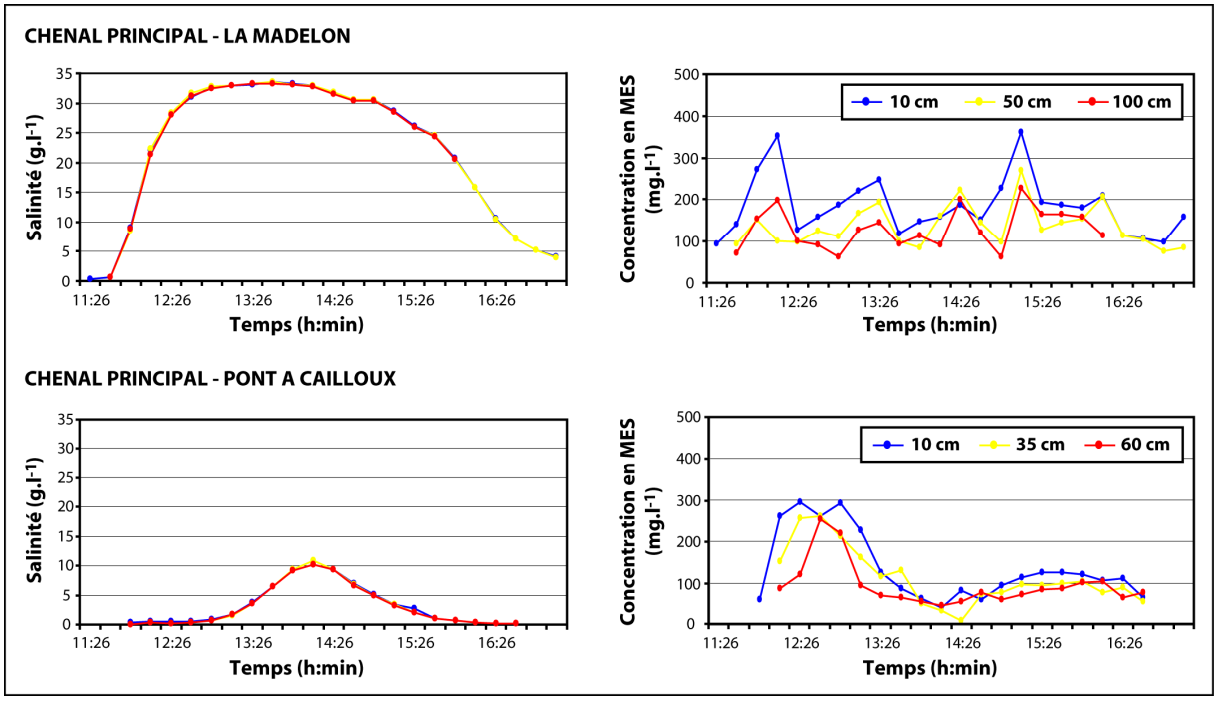


Figure 4.3. Salinité et concentration en MES mesurées dans le chenal principal de l'Authie sur deux sites simultanément : la Madelon (référence) et Pont à Cailloux (en amont) (05/05/2004, coefficient 104, marnage = 8,92 m).

Figure 4.3. *Salinity and SPM concentration measured in the main channel of the Authie simultaneously at two sites: la Madelon (reference) and Pont à Cailloux (upstream) (05/05/2004, tidal range = 8.92 m).*

1.2.2. CHENAL DE MAREE

Les mêmes expérimentations ont été menées sur un chenal de marée important au tracé rectiligne situé en rive Nord de l'estuaire. Il est connecté à une faible arrivée d'eau douce à sa tête. Malgré cette dernière caractéristique qui à priori ne semble pas à même de troubler fortement son fonctionnement vis-à-vis de la salinité, ce chenal nous a semblé suffisamment représentatif et son accessibilité intéressante. Les marées choisies ont un marnage théorique à l'embouchure de 7,41 m pour la marée de mortes-eaux et de 9,12 m pour celle de vives-eaux (Figure 4.4). Sur la première marée, la salinité oscille entre 15 et 25 g.l^{-1} avec une légère stratification observée au début du flot et au milieu du jusant respectivement entre le fond et les 35-60 cm supérieurs puis entre les 35 premiers centimètres et la surface. Le maximum est obtenu sur le fond lors du flot. Pour la seconde marée, la salinité s'établit

entre 15 et 30 g.l^{-1} sans stratification évidente entre les deux niveaux de mesure (ici la mesure de surface n'a pu être réalisée) hormis sur un point. Les maxima sont obtenus au flot à 27 et 30 g.l^{-1} peu avant que la station ne soit momentanément plus accessible en raison de l'inondation du schorre.

Après une nette augmentation marquant le flot avec 200 mg.l^{-1}, la turbidité décroît progressivement au cours de la marée de mortes-eaux autour de 50 mg.l^{-1}. De façon générale, les concentrations en MES sont légèrement plus fortes dans le bas de la colonne d'eau. Sur la seconde marée, les différences de concentrations de MES sont bien plus importantes entre les deux niveaux. Initialement à 50 mg.l^{-1}, la turbidité à 60 cm oscille ensuite entre 200 et 250 mg.l^{-1}. Au fond, elle s'établit autour de ces dernières valeurs dès le début de la marée avec cependant deux pics très marqués, l'un très étroit à 475 mg.l^{-1} au flot avant la lacune de données et l'autre plus large à 500 mg.l^{-1} en fin de jusant.

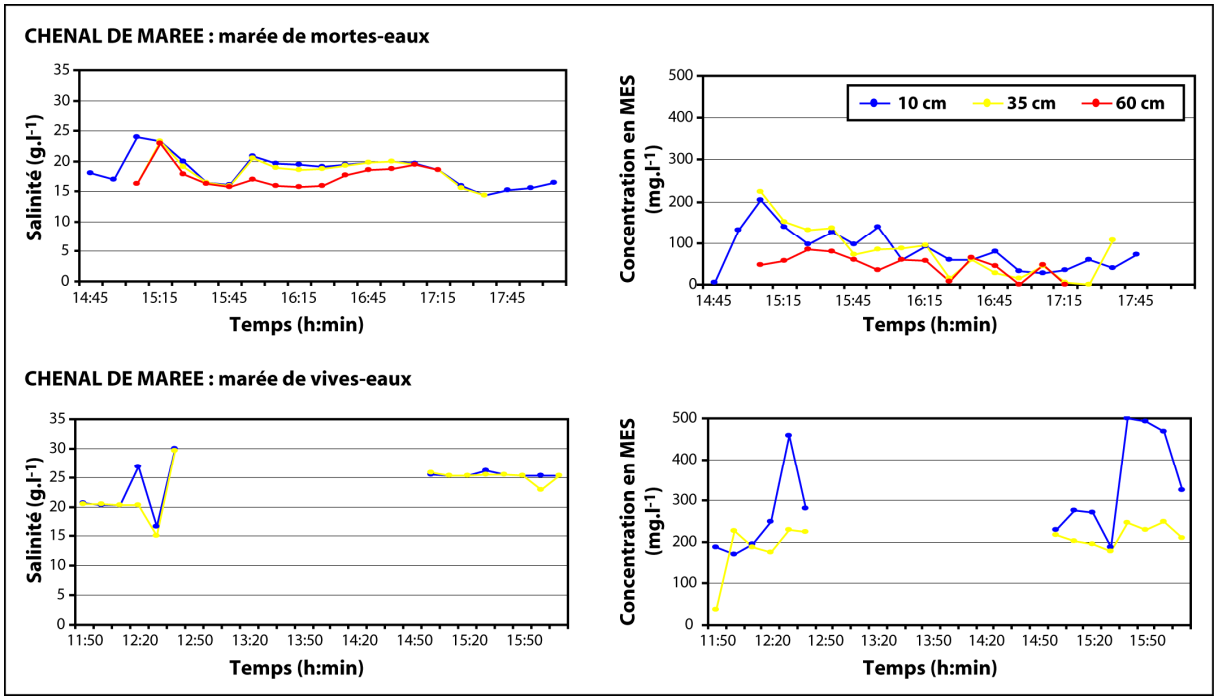


Figure 4.4. Salinité et concentration en MES mesurées dans un chenal de marée pendant une marée de mortes eaux (marée du 20/05/2003, coefficient 71, marnage = 7,41 m) et de vives-eaux (marée du 17/05/2003, coefficient 105, marnage = 9,12 m).

Figure 4.4. *Salinity and SPM concentration measured in a tidal channel over a neap (20/05/2003, tidal range = 7.41 m) and a spring tide (17/05/2003, tidal range = 9.12 m).*

De nouveau nous avons réalisé des mesures simultanément sur le site de référence à la Madelon et le chenal de marée lors d'une marée d'équinoxe avec une amplitude de 8,88 m (Figure 4.5). La salinité présente la même progression au cours du flot jusqu'à 30 g.l^{-1} sur les

deux stations bien qu'elle débute à une valeur de 17 $g.l^{-1}$ lors de l'entrée des masses d'eau dans le chenal de marée. Lors du jusant, l'évolution temporelle de la salinité est cependant bien différente selon le site. Tandis que la salinité se maintient à 30 $g.l^{-1}$ dans le chenal de marée, elle décroît rapidement dans le chenal principal avec notamment une légère stratification au début du jusant.

La turbidité associée oscille entre 100 et 450 $mg.l^{-1}$ pour le chenal principal et entre 25 et 275 $mg.l^{-1}$ pour le chenal de marée. Les concentrations en MES sont dans les deux cas plus importantes au fond que sur le reste de la colonne d'eau bien que cet écart ne soit pas très conséquent sur le premier mètre de la colonne d'eau lors du flot et en fin de jusant à la Madelon. Les pics de concentration lors des deux phases de la marée sur le chenal tidal sont également observés sur le chenal principal avec des valeurs trois fois inférieures au flot et comparables au début du jusant (environ 300 $mg.l^{-1}$).

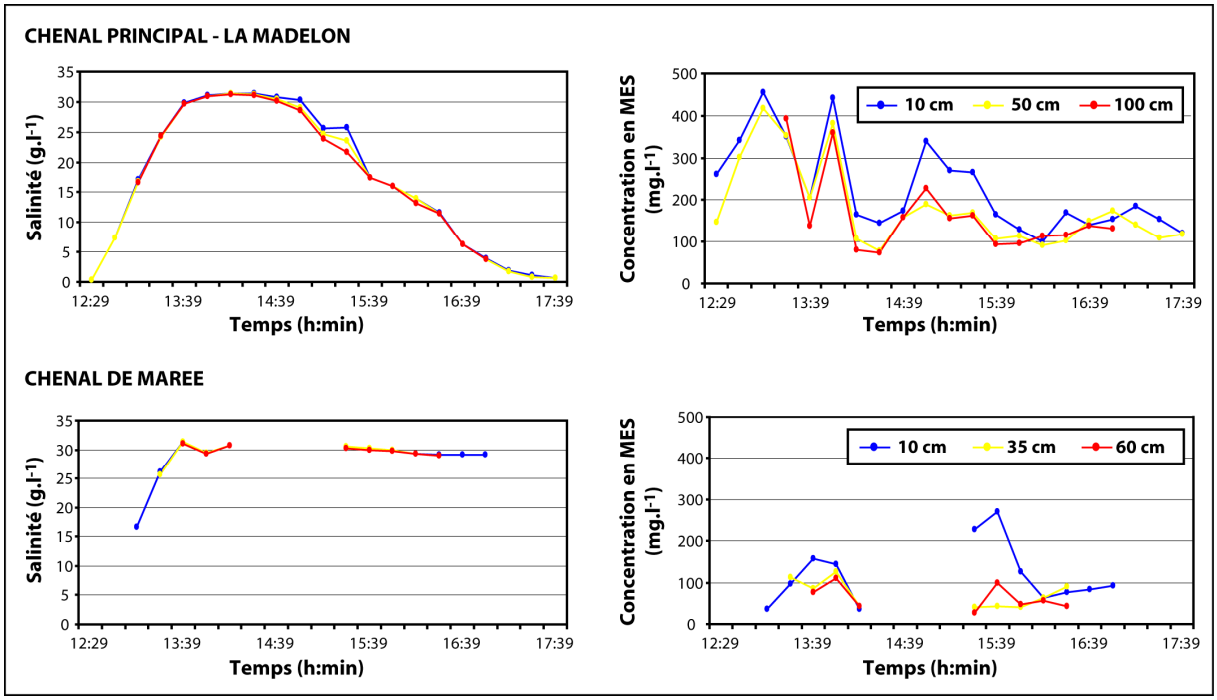


Figure 4.5. Salinité et concentration en MES mesurées dans le chenal principal de l'Authie (la Madelon, référence) et dans un chenal de marée simultanément (07/05/2004, coefficient 100, marnage = 8,88 m).

Figure 4.5. *Salinity and SPM concentration measured in the main channel of the Authie (la Madelon, reference) and in a tidal channel simultaneously (07/05/2004, tidal range = 8.88 m).*

1.2.3. SYNTHESE DES OBSERVATIONS

Nous n'avons pas observé de stratification saline au cours des enregistrements, ce qui confirme les résultats antérieurs concernant le caractère bien mélangé des masses d'eau de l'Authie. En revanche, il semblerait qu'à cette échelle (*i.e.* les soixante premiers centimètres de la colonne d'eau) une ségrégation de la charge de MES soit identifiable. Celle-ci a été observée sur le chenal de marée aux marées de vives-eaux et dans le chenal principal de marée sur tout type de marnage. Cette différenciation verticale s'atténue toutefois de manière conséquente plus en amont. Une charge de fond importante a donc été décelée sans intrusion significative de la marée saline ce qui laisse sous entendre qu'un maximum de turbidité peut se former en Authie grâce à l'action de la marée dynamique.

1.3. COMPORTEMENT DE QUELQUES ELEMENTS DISSOUS

Les sédiments et les MES sont principalement constitués de minéraux détritiques (quartz, feldspaths), d'aluminosilicates (argiles) et de carbonates. On y retrouve également, mais en plus petite quantité, des oxydes de fer (goethite: FeOOH ; magnétite : Fe_3O_4) et de manganèse (hausmannite : Mn_3O_4 ; oxyhydroxyde de manganèse : MnOOH), des sulfures (FeS, pyrite: FeS_2) en milieu anoxique ainsi que d'autres éléments comme le cadmium, le plomb etc… La matière organique ne compose qu'une faible quantité des MES totales en milieu estuarien.

On distingue deux grandes classes d'éléments :

- les espèces peu réactives qui, lors du mélange des eaux douces et salées ne sont influencées pratiquement que par les lois de dilution. Ces espèces sont dites conservatives.
- les espèces plus réactives dont le comportement est directement lié à leurs propriétés chimiques. Ces éléments ne possèdent plus de caractère conservatif. C'est le cas généralement des métaux présents à l'état de traces.

Le comportement conservatif peut être illustré par un graphique portant en ordonnée la concentration et en abscisse la salinité. La droite joignant la concentration d'une espèce dans l'eau douce à sa concentration dans l'eau de mer est la droite de «dilution théorique». Un comportement non conservatif se caractérisera par une relation en général non linéaire, s'écartant plus ou moins fortement de la droite de dilution théorique (Figure 4.6).

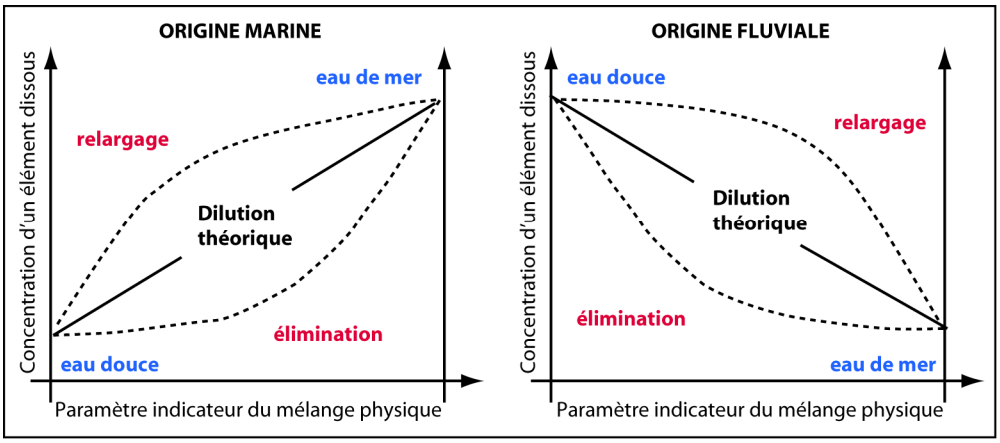


Figure 4.6. Comportement des éléments selon l'origine marine ou fluviale dans un estuaire.

Figure 4.6. *Behaviour of elements depending on marine or river origin in an estuary.*

1.3.1. MATIERE MINERALE

Les teneurs en Ca, K, Mg, Sr et SO_4 des eaux filtrées à 0,45 µm ont été reportées en fonction de la salinité (Figure 4.7). Nous pouvons constater que ces éléments ont un caractère conservatif avec une origine principalement marine. Ils ont donc une inertie face au mélange des eaux douce et salée et suivent donc la loi de dilution théorique. Nous avons aussi comparé les valeurs obtenues avec les valeurs moyennes des estuaires mondiaux. Cette comparaison montre que l'estuaire de l'Authie a globalement un comportement classique pour le strontium, le magnésium et le potassium. Pour le calcium, nos échantillons ont des teneurs plus élevées que la moyenne mondiale, et plus particulièrement aux faibles salinités. Cela signifie que les eaux douces ont des concentrations élevées en calcium, probablement en raison de la nature calcaire du bassin versant constitué essentiellement de craie.

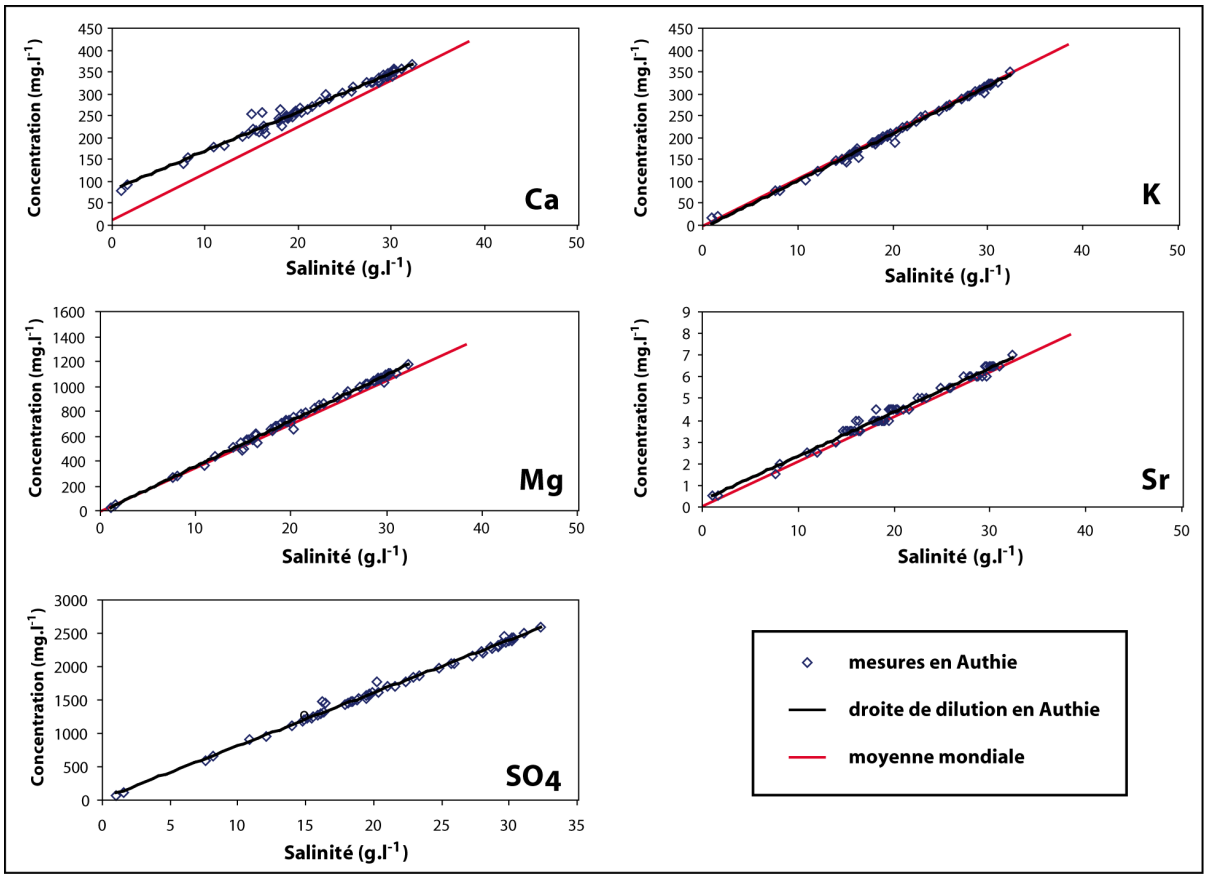


Figure 4.7. Concentration de Ca, K, Mg, Sr et SO_4 dissous en fonction de la salinité des eaux filtrées dans l'estuaire de l'Authie.

Figure 4.7. *Concentration of dissolved Ca, K, Mg, Sr and SO_4 as a function of salinity in filtered Authie estuary water.*

Nous avons choisi de sélectionner ensuite trois marqueurs géochimiques : les carbonates sont tracés par la calcite, les argiles par l'aluminium et les sables par le zirconium en proxy du silicium (cf Chapitre II). Les teneurs en calcium, aluminium et zirconium en fonction du temps ont été quantifiées sur deux marées respectivement dans le chenal principal de l'Authie et dans un chenal de marée (Figure 4.8).

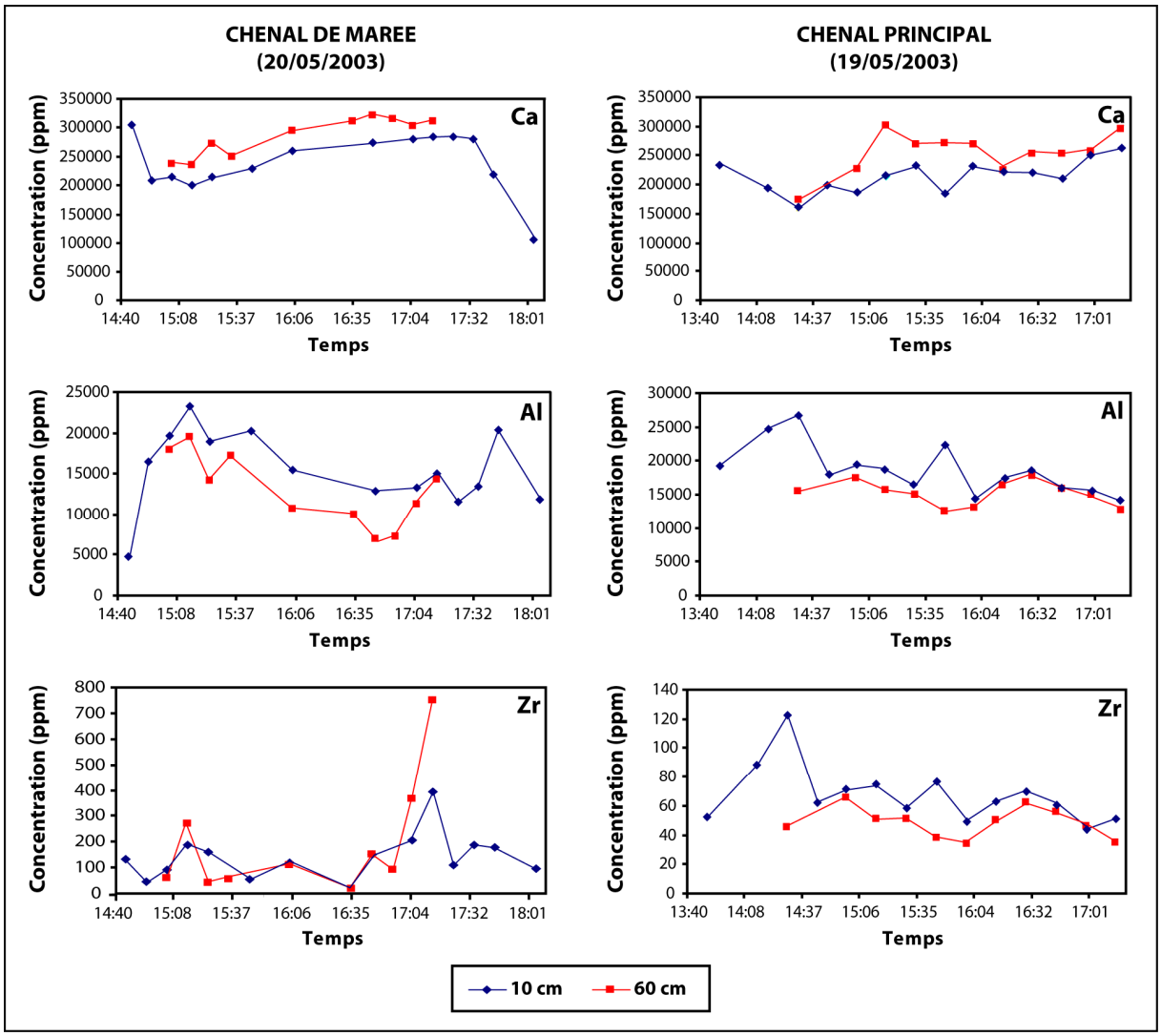


Figure 4.8. Evolution temporelle de la concentration de Ca, Al et Zr dans la MES en fonction du temps dans un chenal de marée (marée du 20/05/2003, coefficient 78, marnage = 7,83 m) et dans le chenal principal à la Madelon (marée du 19/05/2003, coefficient 92, marnage = 8,63 m).

Figure 4.8. *Temporal evolution of Ca, Al and Zr concentrations in SPM in a tidal channel (20/05/2003, coefficient 78, tidal range = 7.83 m) and in the main channel, Madelon site (19/05/2003, tidal range = 8.63 m).*

Le calcium est un élément majeur dans les particules sédimentaires du nord de la France. Il est généralement présent sous forme de carbonate de calcium (calcite : $CaCO_3$) et dans une moindre mesure sous forme de dolomite. Dans les MES analysées, on peut remarquer que les concentrations de calcium sont sensiblement les mêmes quelque soit le site étudié et que leur concentration est légèrement plus importante dans le haut de la colonne d'eau. De plus, lorsque la concentration en MES augmente la concentration en calcium diminue, ce qui voudrait dire que l'augmentation de la MES serait due à d'autre minéraux que la calcite, par exemple aux silicates (principalement le sable) ou alumino-silicates (argiles).

Les concentrations en zirconium sont plus importantes dans le chenal de marée que dans le chenal principal. Aucune corrélation significative n'est visible avec l'évolution de la concentration en MES. Ainsi, il semblerait que l'augmentation de la MES ne soit pas liée aux silicates ce qui paraît surprenant. Les concentrations de zirconium mesurées étant proche de la limite de détection, cette absence de corrélation entre la MES et le zirconium serait donc plutôt liée à un problème analytique. Concernant l'aluminium, les concentrations sur les deux sites sont sensiblement les mêmes et on observe une légère diminution autour de l'étale de haute mer.

Afin de déterminer les proportions des minéraux majeurs, nous allons supposer que le reste de la MES, une fois les taux d'argiles et carbonates déterminés, est principalement composée de sable (SiO_2) étant donné que le zirconium ne semble pas être un traceur fiable pour les silicates (Digne, 2004). La calcite représente 30 à 80 % de la MES et les argiles 5 à 20 %. Les autres éléments ne sont pas représentés car ils ne constituent qu'un faible pourcentage de l'ordre de 5 %. Le sable (SiO_2) composerait alors la MES à hauteur de 10 à 60 %. Il n'y a aucune différence significative entre les sites. De plus, il n'y a pas d'augmentation du pourcentage en SiO_2 durant le flot et le jusant et enfin il n'y a pas d'augmentation du pourcentage d'argile lors de l'étale de pleine mer. Ces observations nous permettent de conclure que les variations semblent être plus ou moins aléatoires à l'échelle locale.

1.3.2. MATIERE ORGANIQUE

La matière organique particulaire est habituellement mesurée en équivalent de carbone (Aminot et Chaussepied, 1983) soit le carbone organique particulaire (COP). Le COP possède un comportement non conservatif et possède deux origines :

- une source autochtone (phytoplancton, bactéries et algues)
- une source allochtone (fleuve, océan, vasière, atmosphère)

Du point de vue de la matière organique particulaire, il n'existe pas de continuum depuis l'eau douce jusqu'à l'eau marine. Lors de la période de production phytoplanctonique (du printemps à l'automne) les différents sous-systèmes (eau douce, estuaire, baie, océan) sont découplés : la MOP présente est principalement autochtone et autotrophe, les échanges de MOP étant nuls ou extrêmement réduits. Lors des fortes crues cependant, la MOP d'origine estuarienne et

terrestre est exportée vers les baies et les océans. Ce matériel sédimente ensuite et peut être remobilisé jusqu'en surface de la colonne d'eau. Les transferts de MOP depuis le continent vers l'océan sont ainsi limités dans le temps, les écosystèmes littoraux macrotidaux jouant le rôle de filtre du matériel particulaire (Savoye, 2001).

Un bon traceur doit présenter des différences importantes selon les stocks que l'on cherche à identifier. Or, étant donnée la relative unité lithologique ces traceurs ne peuvent provenir que de transformations locales des caractéristiques des suspensions : processus biogéochimiques, rejets caractéristiques, radioactivité environnementale. Le carbone organique particulaire et l'azote organique particulaire, notamment à travers le rapport COP/NOP, sont des critères de distinction entre les matières organiques autochtones, éventuellement dégradées, et les matières organiques allochtones (Mouchel et Bonté, 1998). La composition de la matière particulaire marine présente des rapports C/N/P remarquablement uniformes et en moyenne égaux à 106/10/1 (Redfield *et al*., 1963). Dans une zone de forte turbidité, le COP ne représente qu'un faible pourcentage des matières en suspension. Dans le cas de faibles turbidités, il augmente sensiblement car le développement de plancton y est plus favorable (Béghin, 1999).

Des mesures du COP et NOP ont été réalisées en mai 2003, les données en fonction du temps sont représentées en Figure 4.9. On observe une co-évolution temporelle du COP et NOP sur les marées étudiées. De façon générale, leur teneur décroît au cours de la marée. Dans le chenal principal, on observe des concentrations allant de 1000 à 4000 $\mu g.l^{-1}$ avec maximum à 12000 $\mu g.l^{-1}$ pour un marnage de 8,63 m contre 500 à 1500 $\mu g.l^{-1}$ avec maximum à 3000 $\mu g.l^{-1}$ pour un marnage de 6,8 m. Dans le chenal de marée, à marnage comparable avec la deuxième marée du chenal principal, les concentrations en MOP sont deux fois plus élevées avec un pic à 8000 $\mu g.l^{-1}$. Ceci laisse supposer que les quantités de MOP présentes dans les masses d'eau sont plus importantes dans le chenal de marée que dans le chenal principal où celles-ci varient également en fonction de l'amplitude de la marée. La teneur en MOP présente des variations verticales avec notamment des concentrations plus élevées au fond lors du flot. Le chenal de marée est le seul à montrer des concentrations au fond toujours plus importantes tout au long de la marée ainsi qu'un pic en fin de jusant.

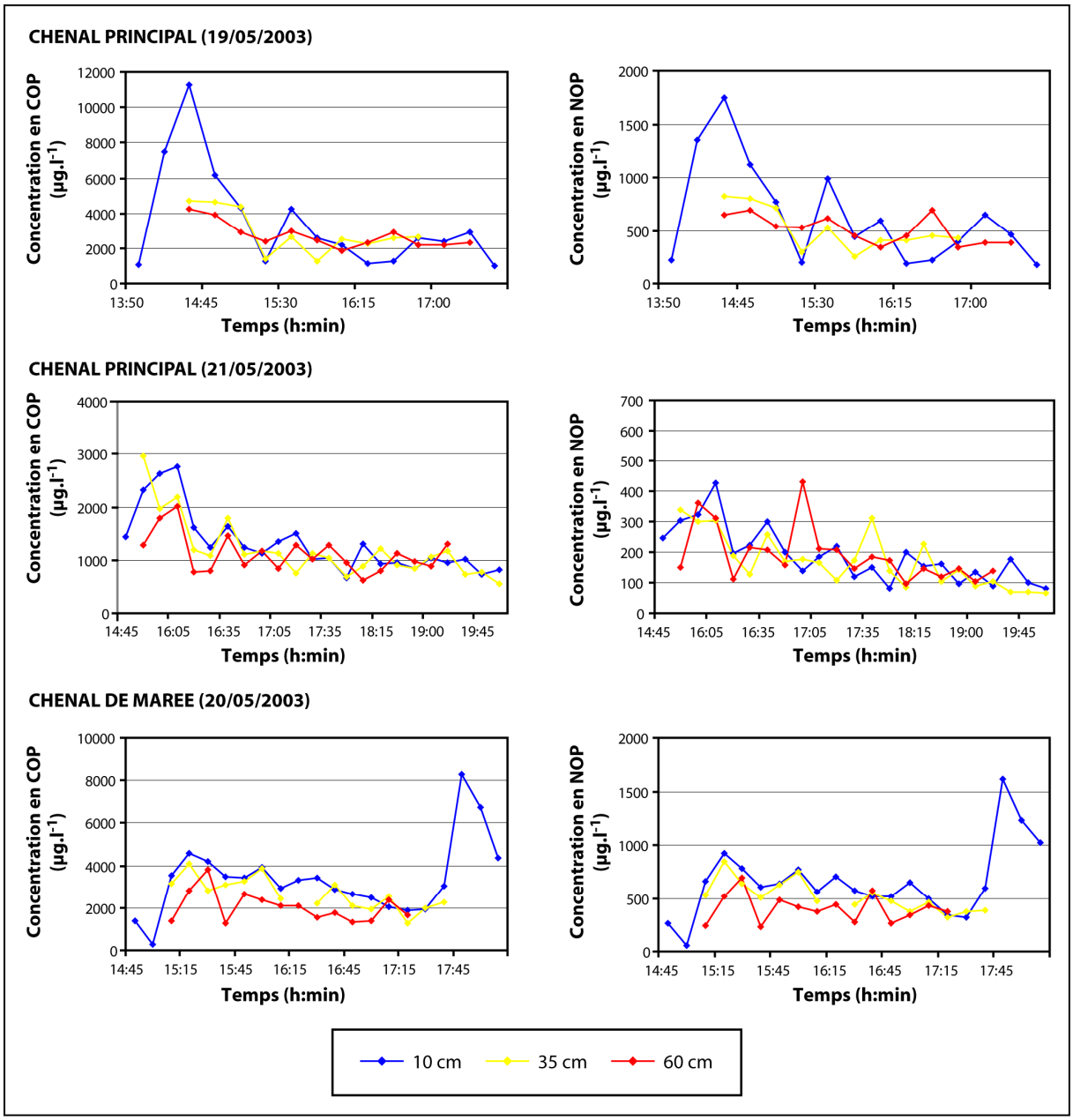


Figure 4.9. Evolution temporelle de la concentration en COP et NOP dans la MES dans un chenal de marée (marée du 20/05/2003, coefficient 78, marnage = 7,83 m) et dans le chenal principal à la Madelon lors de deux marées d'amplitudes différentes (marée du 19/05/2003, coefficient 92, marnage = 8,63 m ; marée du 21/05/2003, coefficient 64, marnage = 6,8 m).

Figure 4.9. *Temporal evolution of Ca, Al and Zr concentrations in SPM in a tidal channel (20/05/2003 tide, coefficient 78, tidal range = 7.83 m) and in the main channel at Madelon site for two different tidal amplitudes (19/05/2003, tidal range = 8.63 m; 21/05/2003, tidal range = 6.8 m).*

Nous avons ensuite reporté les concentrations de COP en fonction de la MES ainsi que le ratio COP/NOP au cours du temps (Figure 4.10). On peut remarquer que les taux restent comparables dans le chenal principal, le COP représentant autour de 25 mg.gMES^{-1} et qu'ils sont environ 2 fois supérieurs dans le chenal de marée avec environ 50 mg.gMES^{-1}. Lors des

faibles marnages, on observe des pics importants en début de flot sur le point le plus bas de la colonne d'eau. Un tel maximum est observé en fin de jusant sur le chenal de marée et sur le chenal principal lors de la marée la plus forte. Cette observation pourrait être liée à la présence de macroflocs. Hormis pour le chenal principal en faible marnage, la teneur en COP en fonction de la MES présente ne montre pas de stratification verticale évidente. Le ratio COP/NOP est relativement stable au cours du temps et oscille entre 4 et 6 à l'exception du chenal principal lors de l'amplitude tidale la plus forte où il atteint une valeur de 12, quasi comparable au niveau atteint en milieu marin. Sur les deux autres marées, on peut observer un certain déficit en azote. Ce déséquilibre pourrait être lié à la consommation sur place du phytoplancton.

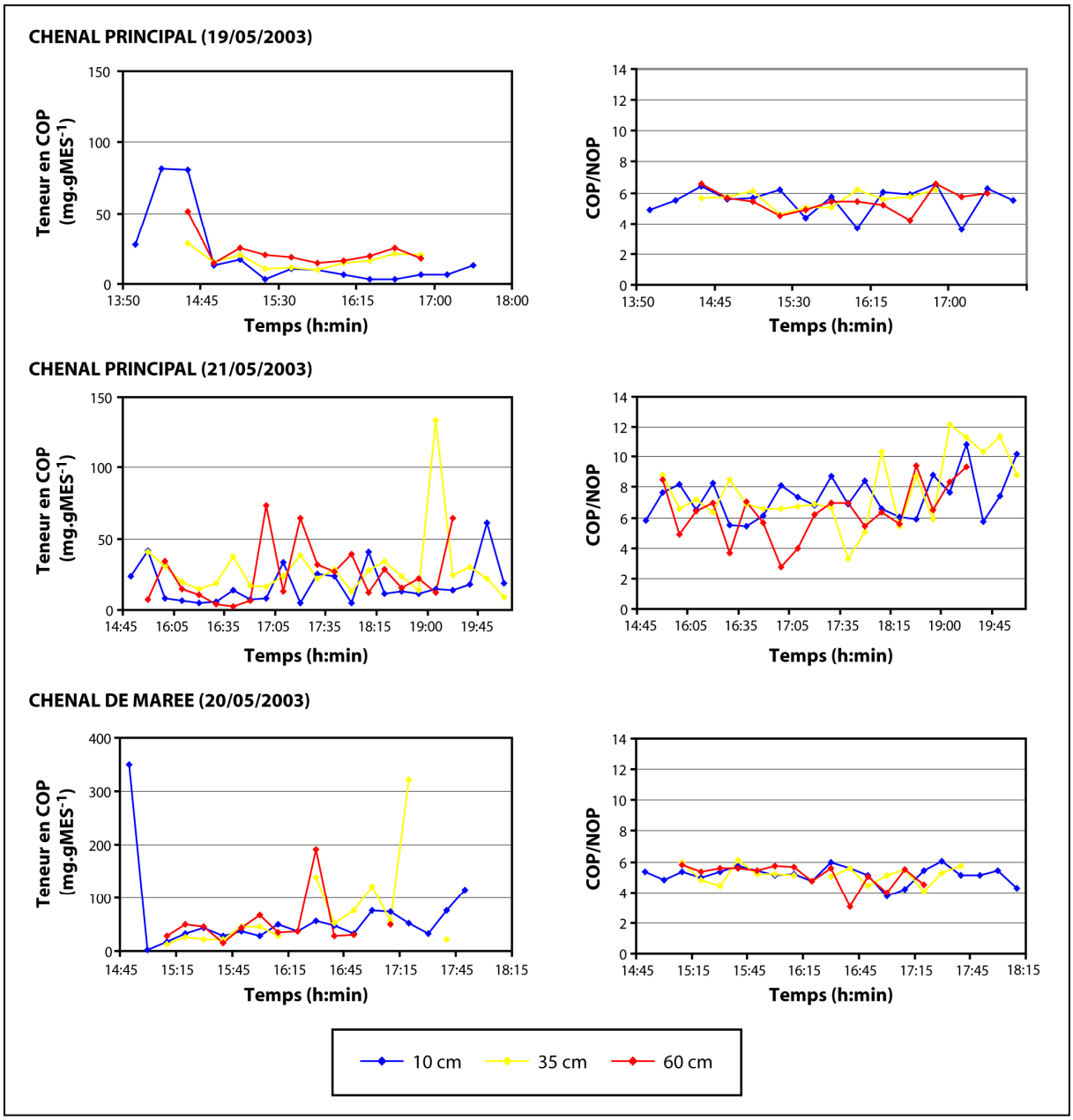


Figure 4.10. Evolution temporelle de la teneur en COP en fonction de la MES totale et du rapport COP/NOP dans chenal de marée (marée du 20/05/2003, coefficient 78, marnage = 7,83 m) et dans le chenal principal à la Madelon lors de deux marées d'amplitudes différentes (marée du 19/05/2003, coefficient 92, marnage = 8,63 m ; marée du 21/05/2003, coefficient 64, marnage = 6,8 m).

Figure 4.10. *Temporal evolution of COP as a function of total SPM and COP/NOP ratio in a tidal channel (20/05/2003 tide, coefficient 78, tidal range = 7.83 m) and in the main channel at Madelon site for two different tidal amplitudes (19/05/2003, tidal range = 8.63 m; 21/05/2003, tidal range = 6.8 m).*

2. ETUDES HYDROSEDIMENTAIRES FINES

2.1. CHENAUX ESTUARIENS

2.1.1. CHENAL PRINCIPAL

Le site de la Madelon a fait l'objet de quantification des MES par le biais de différents outils. Suite aux suivis réalisé sur les marées de vives-eaux, il était important pour nous d'évaluer la quantité de MES et les caractéristiques de celles-ci dans la colonne d'eau sans pénétration significative de la marée saline. Nous avons donc choisi une marée de faible marnage pour installer la station couplant ADV pour les mesures courantométrique et LISST-25X / ASM pour les mesures de MES.

La Figure 4.11 présente les différentes observations qui ont pu être faites le 10/05/2004. Pour un marnage théorique de 5,55 m à l'embouchure, le marnage observé ici n'est que de 1,6 m, confirmant l'amortissement considérable de la marée à ce niveau (cf Chapitre III). L'écoulement est ici parfaitement canalisé par le chenal principal qui ne déborde d'ailleurs pas de son lit avec une alternance des directions Est puis Ouest. La composante longitudinale est donc nettement dominante avec cependant une action transversale à hauteur de 1/3 de la valeur de cette dernière. La renverse des courants est quasi synchrone avec l'étale de haute mer, on observe un léger décalage vers le début du jusant. Les vitesses sont ici plutôt modérées avec une légère prédominance du flot sur le jusant dont les vitesses restent cependant concurrentielles avec des maxima obtenus en début de flot et au milieu du jusant (0,4 contre 0,3 $m.s^{-1}$). On observe une concentration de MES entre 250 et 300 $mg.l^{-1}$ à 10 cm et de 350 $mg.l^{-1}$ pendant le flot et autour de 150 $mg.l^{-1}$ avec cependant trois pics importants (325, 475 et 700 $mg.l^{-1}$) au jusant à 40 cm. La concentration volumique totale à 40 cm commence sur une valeur de 200 $\mu l.l^{-1}$ au début de la marée puis s'élève très rapidement au cours du flot à travers deux larges pics montant alors jusqu'à 750 et 600 $\mu l.l^{-1}$ avant de reprendre sa valeur de base à l'étale de haute mer. On observe alors un pic important de concentration en début de jusant (600 $\mu l.l^{-1}$) pour ensuite retrouver quasiment la valeur initiale à partir de mi-perdant. Chaque augmentation de la concentration totale peut être reliée à une augmentation de la concentration des particules fines (< à 63 µm) qui atteint 100 $\mu l.l^{1}$ pour le pic le plus important. Le diamètre moyen de la gamme totale de MES est compris entre 50 et 100 µm. Le diamètre des particules supérieures à 63 µm se situe quand à lui entre 200 et 500 µm. Les valeurs les plus importantes sont relevées autour de l'étale de haute mer et

pourraient être reliées à la floculation d'agrégats fins qui pourrait avoir lieu quand les courants sont très faibles ou nuls (seuil estimé ici à 0,1 $m.s^{-1}$).

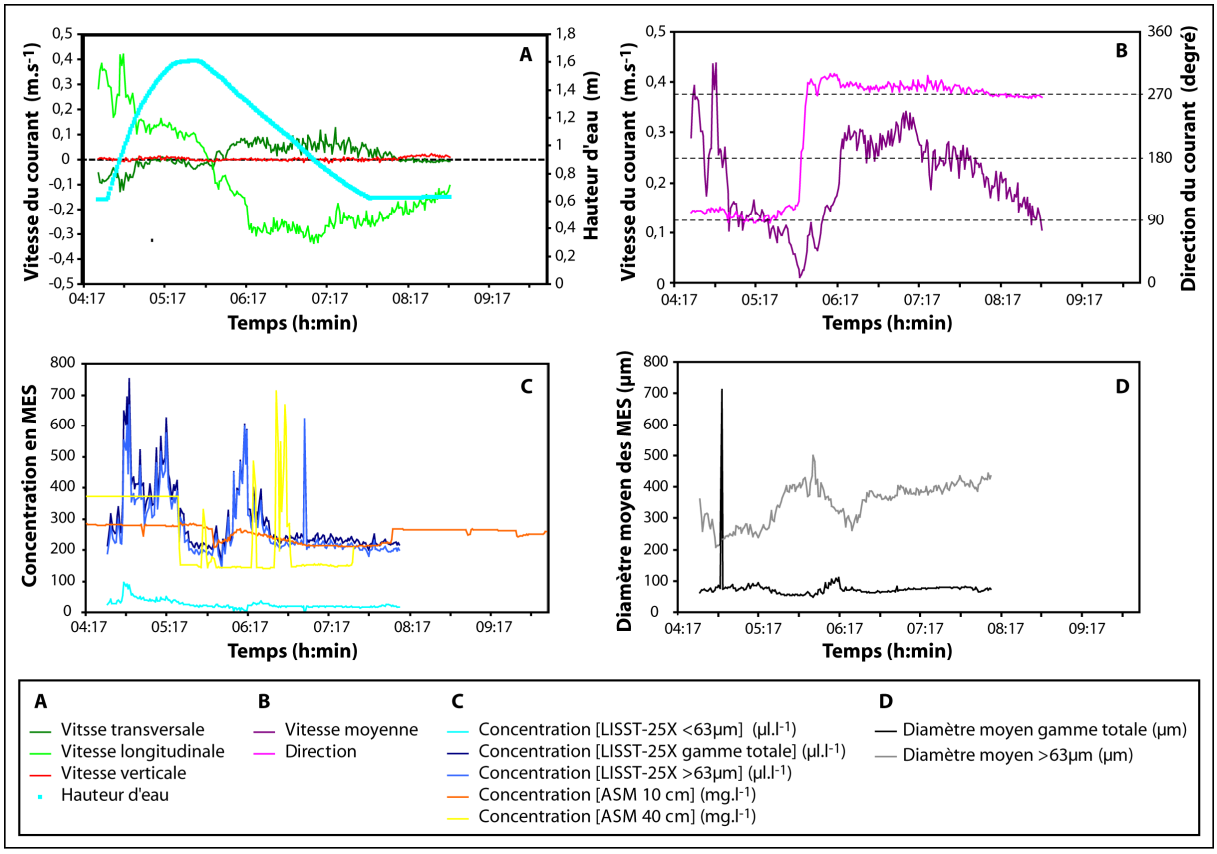


Figure 4.11. Enregistrement courantométrique (ADV, A et B) et des MES (LISST et ASM, C et D) dans le chenal principal (marée du 10/05/2004, coefficient 56, marnage 5,55 m).

Figure 4.11. *Records of tidal currents (ADV, A and B) and SPM (LISST and ASM, C and D) in the main channel (10/05/2004, tidal range = 5.55 m).*

2.1.2. CHENAL DE MAREE

2.1.2.1. Sans débordement

Nous avons ensuite étudié plus précisément un chenal de marée selon le même protocole en choisissant deux marées de marnages différents où celui-ci déborde ou non. La Figure 4.12 regroupe les enregistrements obtenus dans le chenal sur un coefficient de marée suffisamment élevé pour que les masses d'eau remplissent bien celui-ci sans toutefois franchir ses berges. A partir du moment où les mesures courantométriques deviennent cohérentes, nous n'observons pas de variation significative du plan d'eau. Une très faible élévation

marque juste l'étale de haute mer où à lieu la renverse des courants de marée. Le flot n'est ici pas dominant sur le jusant, ni dans sa durée ni dans les vitesses de courants enregistrés. La composante longitudinale domine complètement l'orientation de courants pendant la marée, résultat de la contrainte réalisée par les berges du chenal. On remarque cependant un pic de vitesse vers le haut de la colonne d'eau en fin de jusant. Les vitesses d'écoulement sont cependant extrêmement faibles et ne dépassent pas 0,15 $m.s^{-1}$. Les valeurs maximales sont obtenues au début du flot et en fin de jusant avec notamment une deuxième accélération en toute fin de marée.

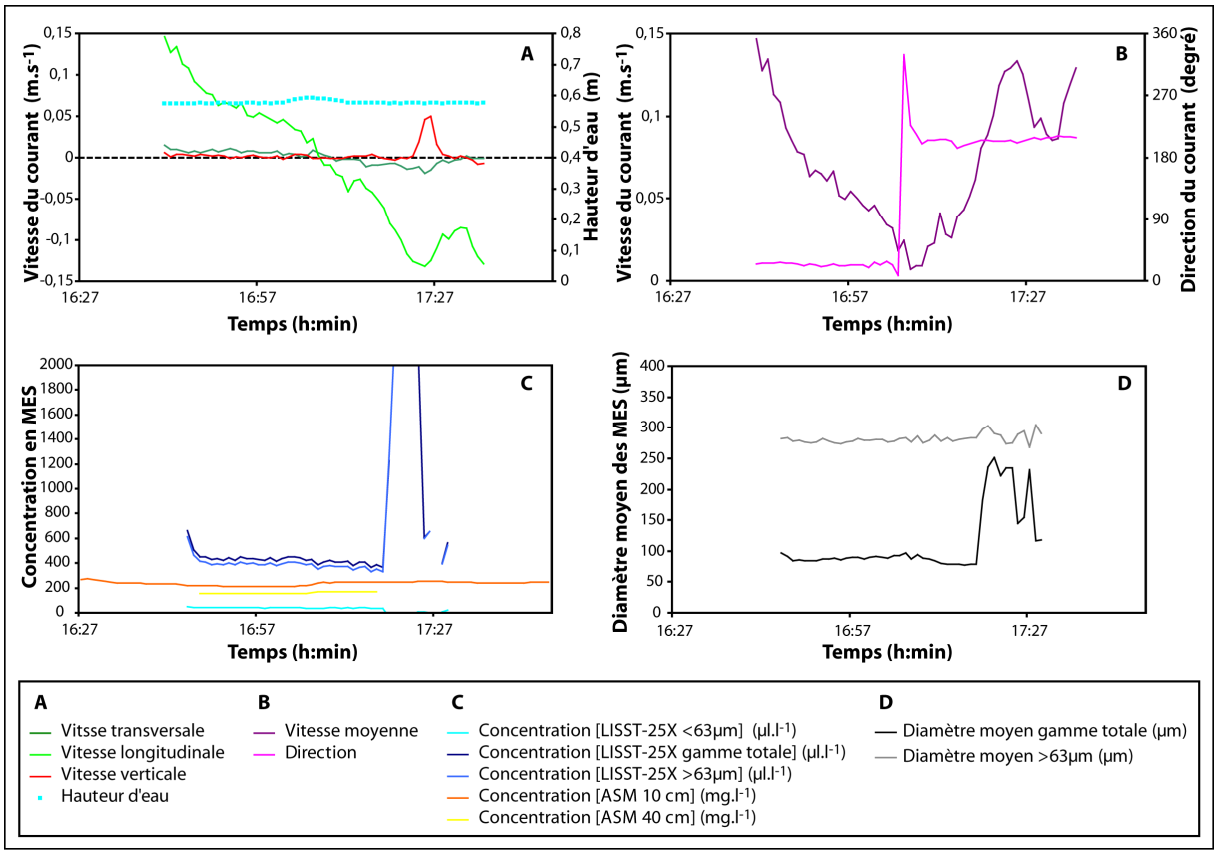


Figure 4.12. Enregistrements des courants de marée (ADV, A et B) et des MES (LISST et ASM, C et D) dans un chenal de marée sans débordement (marée du 10/05/2004, coefficient 63, marnage 6,15 m).

Figure 4.12. *Records of tidal currents (ADV, A and B) and SPM (LISST and ASM, C and D) in a tidal channel without over-bank flooding (10/05/2004, tidal range = 6.15 m).*

Les concentrations de MES mesurées par l'ASM à 10 et 30 cm sont stables autour de 200 $mg.l^{-1}$ pendant la marée. Après un pic en début de flot à 600 $\mu l.l^{-1}$, la concentration volumique des MES reste constante autour de 400 $\mu l.l^{-1}$ avant de présenter une très forte augmentation en partie artéfactuelle d'après l'allure des enregistrements. Le diamètre moyen

des particules supérieures à 63 µm reste lui aussi quasi constant autour de 270 µm tandis que celui de la gamme totale s'établit autour de 75 µm avant d'augmenter brusquement en fin de perdant à travers deux pics montant jusqu'à 250 µm. Ces pics peuvent être reliés à des augmentations simultanées des vitesses de courant et donc à une remise en suspension des sédiments les plus fins. La direction de la composante verticale enregistrée semble confirmer cette observation.

2.1.2.2. Avec débordement

La même expérience a été reproduite à un coefficient plus élevé où le chenal de marée déborde largement de son lit (Figure 4.13). Le marnage observé est alors de 1,8 m pour un marnage théorique de 9,03 m à l'embouchure. Les courants sont également très largement dominés par la composante longitudinale malgré une participation légère et constante de la composante transversale au cours du flot (environ 0,1 $m.s^{-1}$) sauf en fin de marée où la situation s'inverse brutalement avec un écoulement latéral important en direction du chenal dû à la vidange des hauts niveaux adjacents (marais salés). Leur intensité est bien plus importante que précédemment avec des maxima intervenant à mi-flot et mi-jusant. Cette fois-ci le jusant domine le flot avec respectivement 0,8 et 0,6 $m.s^{-1}$ enregistrés.

Les concentrations pondérales et volumiques atteignent des valeurs comparables en début de flot (400 $mg.l^{-1}$ et $µl.l^{-1}$). La concentration volumique baisse ensuite progressivement, notamment à partir de l'augmentation de l'intensité des courants de flot, pour attendre des valeurs faibles (50 $µl.l^{-1}$ environ). On observe ensuite deux pics en milieu et fin de jusant correspondant à deux variations nettes des vitesses d'écoulement des masses d'eau. Alors que la concentration massique des MES à 40 cm se maintient autour des valeurs initiales, celle à 10 cm chute de 100 $mg.l^{-1}$ peu avant la renverse. Les deux concentrations montrent ensuite une série de pics tout au long du jusant. Le diamètre moyen de la gamme totale de MES se situe entre 10 et 50 µm en ne prenant pas en compte les fortes augmentations de la fin du jusant (200 et 125 µm) et l'allure de la courbe est semblable à celle des concentrations volumiques. Le diamètre de particules les plus grosses suit une évolution comparable avec une valeur basale comprise entre 100 et 150 µm.

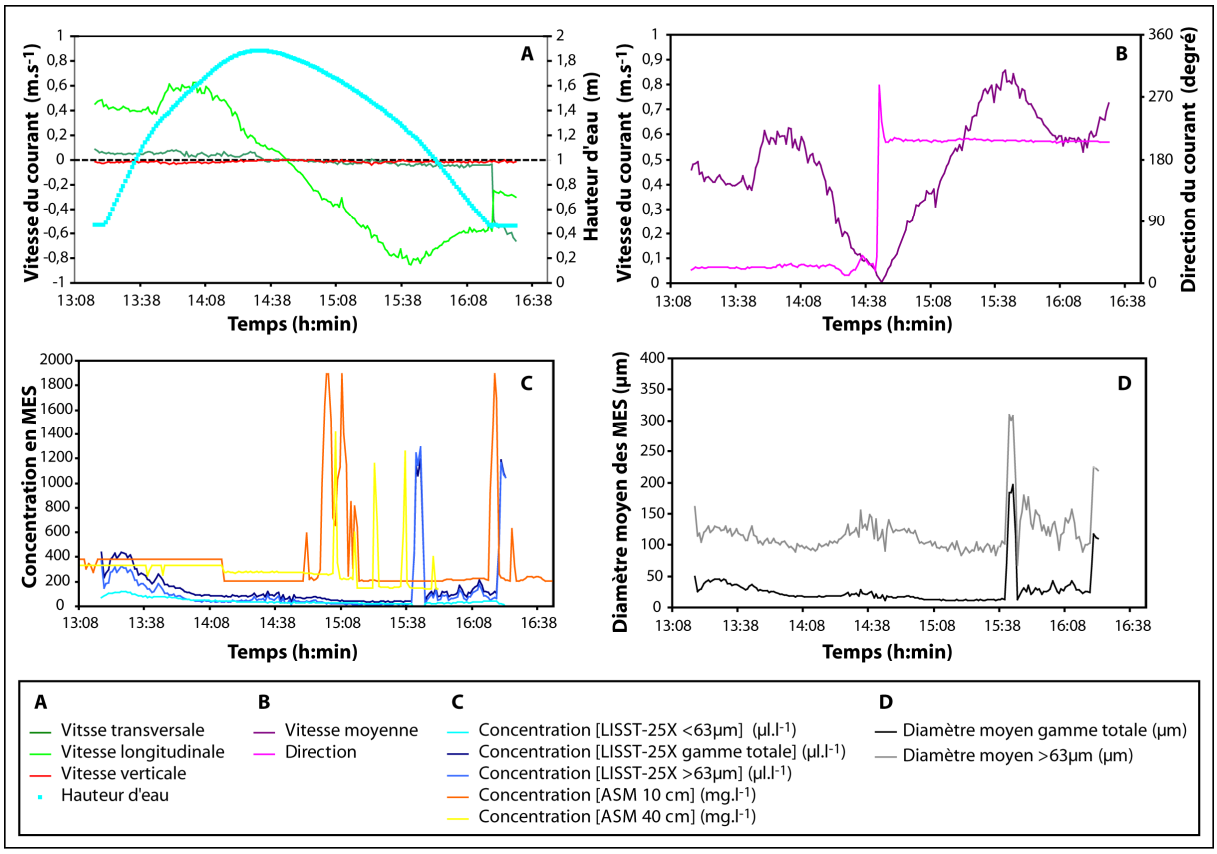


Figure 4.13. Enregistrement courantométrique (ADV, A et B) et des MES (LISST et ASM, C et D) dans un chenal de marée avec débordement (marée du 07/05/2004, coefficient 100, marnage 9,03 m).

Figure 4.13. *Records of tidal currents (ADV, A and B) and SPM (LISST and ASM, C and D) in an overflooding tidal channel (07/05/2004, tidal range = 9.03 m).*

2.2. ZONES INTERTIDALES

2.2.1. MARAIS SALES

2.2.1.1. Avec microfalaise d'érosion

La Figure 4.14 regroupe les enregistrements réalisés sur le marais adjacent au chenal de marée et présentant donc une microfalaise (profil P3). La hauteur d'eau mesurée sur le schorre à l'étale de haute mer est relativement faible (0,8 m) pour un marnage théorique conséquent (9,11 m). La renverse des courants à lieu peu après la marée haute avec un décalage d'environ 10 min. La marée est également dominée par le flot d'une durée plus courte mais avec des courants plus intenses qui restent cependant très faibles avec un maximum à 0,13 $m.s^{-1}$. La composante longitudinale gouverne globalement les courants de

marée mais la composante transversale se manifeste également en début et fin de marée avec respectivement une direction vers l'intérieur du marais (« *onshore* ») et vers le chenal (« *offshore* »). Les courants moyens prennent une direction Nord Nord-Ouest pendant 5 min puis Nord Nord-Est au flot tandis qu'au jusant ils s'orientent graduellement vers l'ouest puis vers le Sud. Les courants verticaux sont orientés vers le haut de la colonne d'eau et ne sont pas négligeables jusqu'à la renverse des courants.

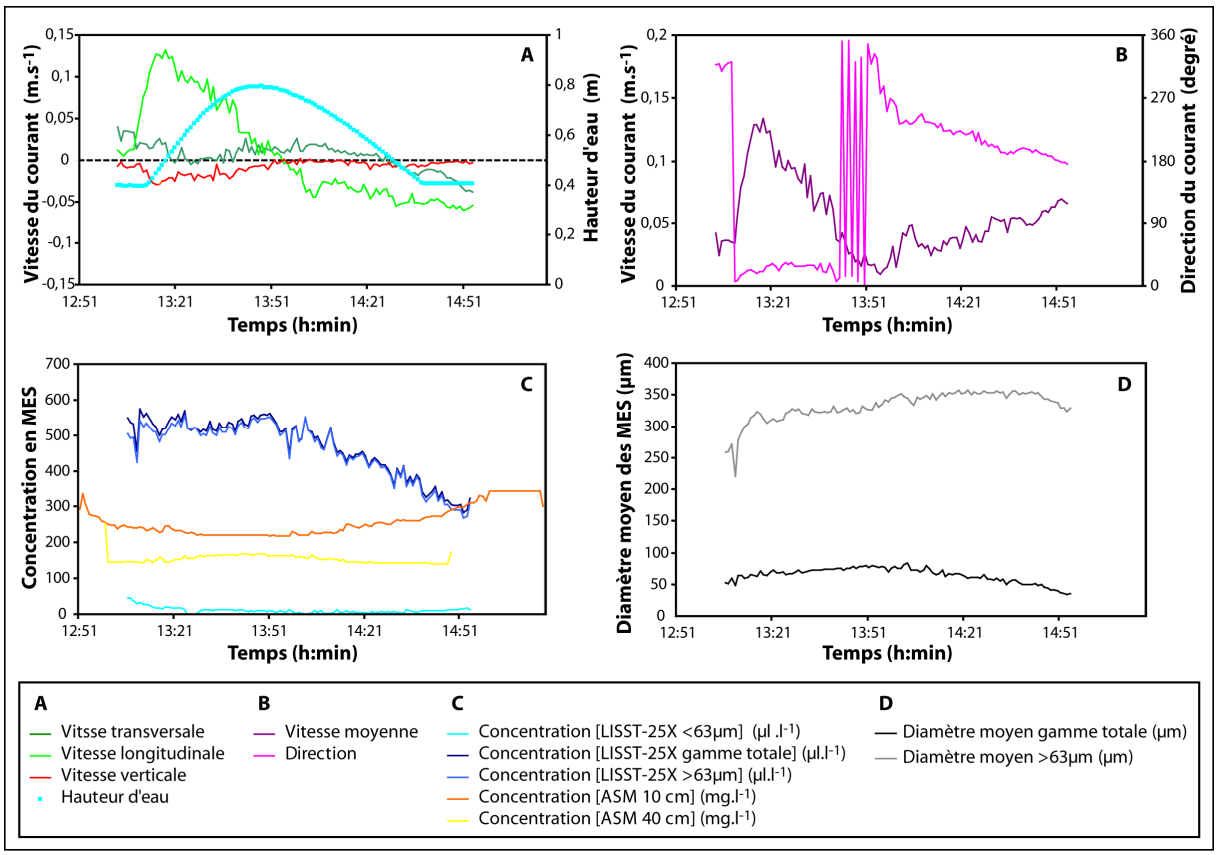


Figure 4.14. Enregistrement courantométrique (ADV, A et B) et des MES (LISST et ASM, C et D) sur un schorre avec microfalaise d'érosion (marée du 06/05/2004, coefficient 105, marnage 9,11 m).

Figure 4.14. *Records of tidal currents (ADV, A and B) and SPM (LISST and ASM, C and D) in a salt marsh with a microcliff transition (06/05/2004, tidal range = 9.11 m).*

Pendant ce laps de temps, la concentration volumique de MES oscille entre 500 et 550 µl.l^{-1} hormis en tout début de flot où celle-ci est nettement plus faible avec 425 µl.l^{-1}. Elle décroît ensuite progressivement tout au long du jusant jusqu'à 300 µl.l^{-1}. La concentration pondérale observée à 10 cm est plus élevée en début et fin de marée avec 300 mg.l^{-1} avec une valeur basse à l'étale de haute mer (225 mg.l^{-1}). Il en est de même à 10 cm avec une concentration comparable à celle du fond en début d'enregistrement puis s'établissant autour de 150 mg.l^{-1}.

Le diamètre moyen des MES pour la gamme totale suit la même évolution que la concentration massique au même niveau. Il augmente de 50 à 75 µm pendant le flot pour diminuer jusqu'à 25 µm lors du jusant. Le diamètre des particules supérieures à 63 µm est de 260 µm en début de marée, enregistre une brusque diminution à 210 µm puis augmente progressivement tout au long de la marée.

2.2.1.2. Avec transition progradante

Des enregistrements similaires ont été réalisés sur un schorre progradant plus en aval (profil P2) en arrière de la ceinture de spartine. Nous avons observé une hauteur d'eau maximale de 1,2 m pour un marnage théorique de 9,09 m (marée comparable à celle étudiée précédemment) (Figure 4.15). La marée est ici moins asymétrique et même si les courants sont plus intenses au flot qu'au jusant, les durées des deux phases de la marée sont équivalentes. Les courants de marées présentent des valeurs similaires à la première étude des marais mais cette fois-ci c'est la composante transversale qui domine en raison de l'orientation du marais. L'orientation et la vitesse du courant moyen sont toutefois quasi-similaires.

Les concentrations mesurées par l'ASM restent presque constantes à 225-250 $mg.l^{-1}$ (10 cm) et 140 $mg.l^{-1}$ au cours de la marée, valeurs également mesurées sur le schorre précédemment. La concentration volumique enregistre quant à elle un pic à 625 $\mu l.l^{-1}$ en début de flot avant de redescendre rapidement autour de 200 puis 150 $\mu l.l^{-1}$. La concentration volumique atteint des niveaux plus faibles que sur le schorre à microfalaise. Le diamètre moyen des MES reste stable à 50 µm. Celui des particules plus grossières varie entre 300 et 250 µm jusqu'à mi-perdant puis augmente rapidement jusqu'à 450 µm. Les macro-particules en transit vers le large sont ici de plus grande taille.

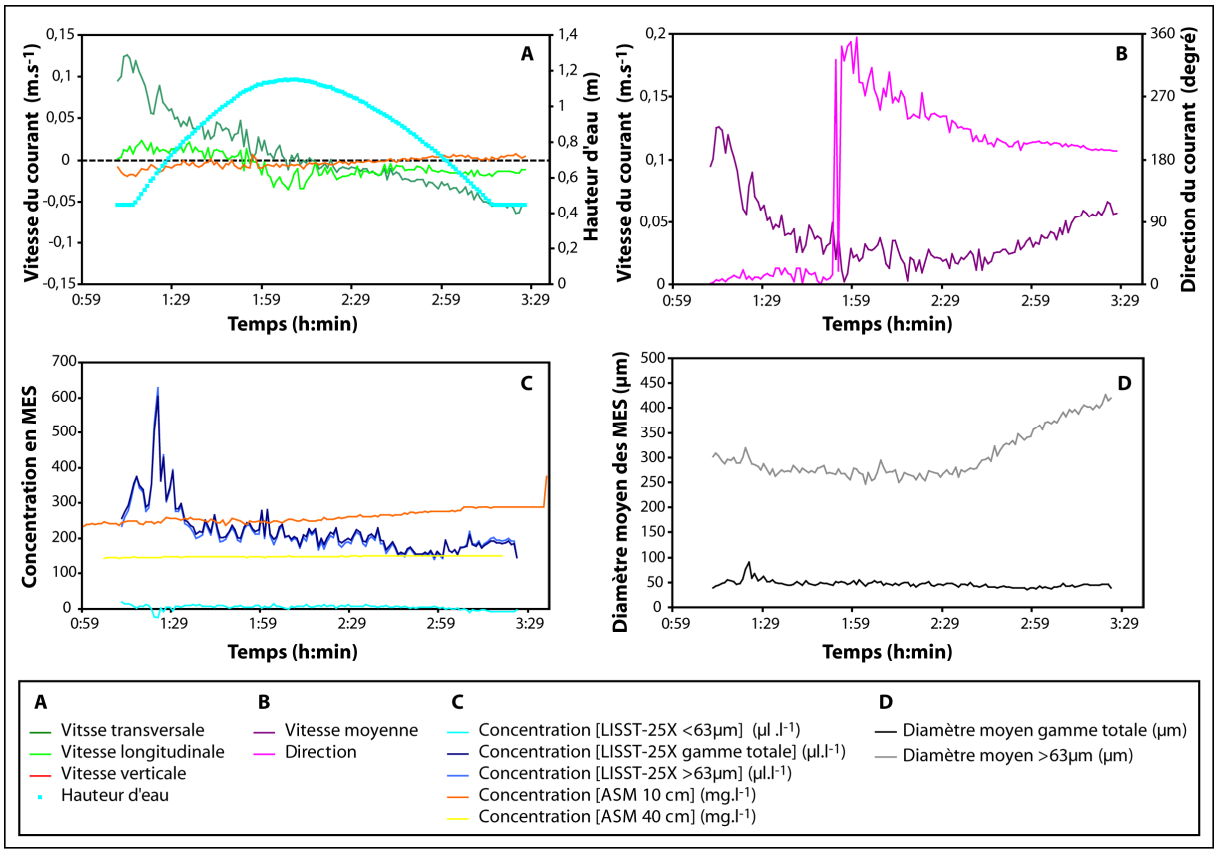


Figure 4.15. Enregistrement courantométrique (ADV, A et B) et des MES (LISST et ASM, C et D) sur un schorre progradant (marée du 07/05/2004, coefficient 103, marnage 9,09 m).

Figure 4.15. *Records of tidal currents (ADV, A and B) and SPM (LISST and ASM, C and D) in a salt marsh with a progrational transition (07/05/2004, tidal range = 9.09 m).*

2.2.2. VASIERE PRINCIPALE

La même expérience a été réitérée sur la vasière principale, non loin de la zone pionnière du schorre progradant étudié. Les résultats sont présentés en Figure 4.16. La hauteur d'eau maximale observée est de 0,9 m pour un marnage théorique de 7,05 m à l'embouchure. Les courants moyens sont ici aussi assez faibles et s'orientent au Nord puis à l'Ouest. Les composantes horizontales du courant participent de façon presque équivalente à l'écoulement des masses d'eau. Les concentrations pondérales en MES sont constantes autour de 225 mg.l^{-1} (à 10 cm) et 185 mg.l^{-1} (à 40 cm). On observe cependant une série de pics avec une augmentation pouvant atteindre 700 mg.l^{-1} au début du flot quand la hauteur d'eau ne dépasse pas 60 cm avec des courants moyens inférieurs à 0,1 m.s^{-1}. La concentration volumique enregistre quant à elle de nombreuses variations tout au long de la marée avec un niveau de base qui se situe entre 800 et 500 mg.l^{-1} et des pics à 2000, 1400 et 1200 mg.l^{-1}. Le diamètre

moyen de la gamme totale oscille entre 75 et 125 µm avec les mêmes pics observés précédemment à 175, 160 et 140 µm. Le diamètre des plus grosses MES augmente progressivement de 275 à 325 µm avec cependant un pic à 375 µm correspondant au premier pic d'intensité du jusant et une baisse brutale jusqu'au niveau de base (275 µm) en fin de jusant.

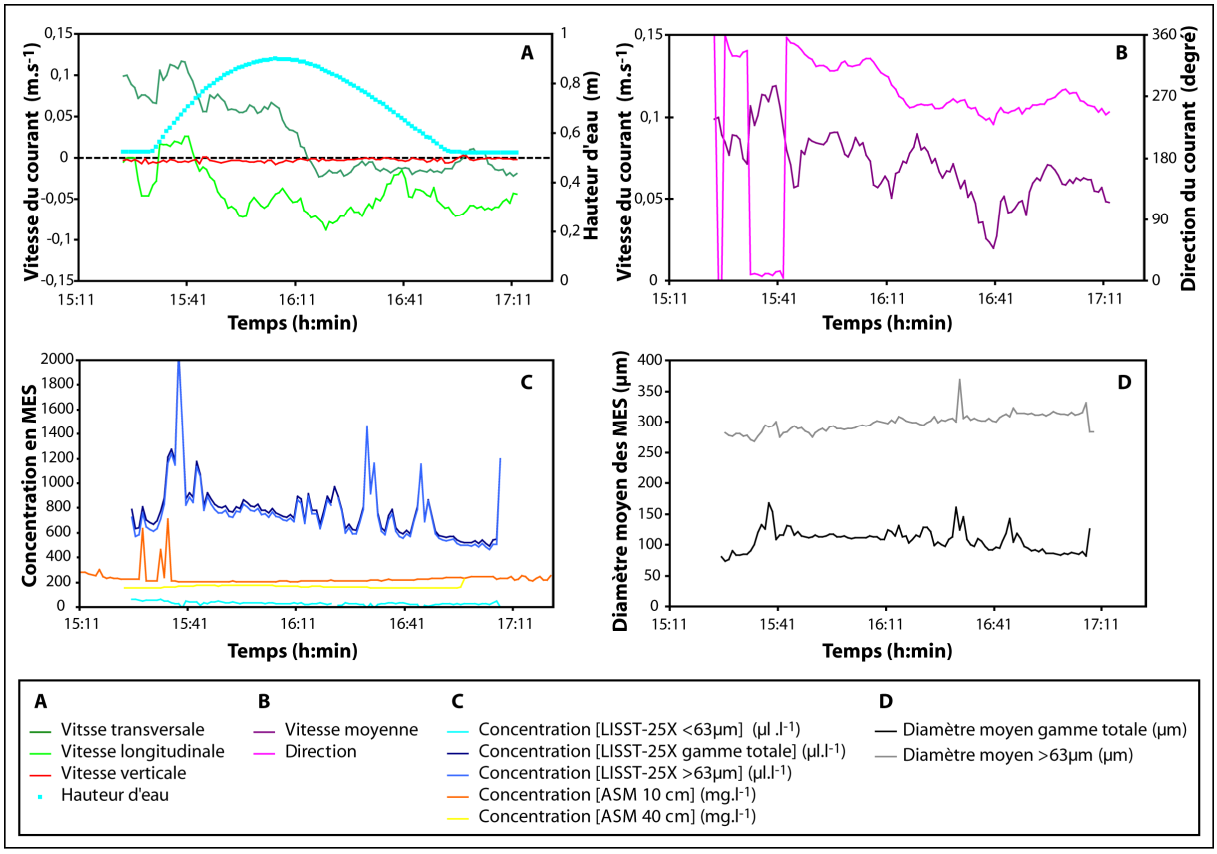


Figure 4.16. Enregistrement courantométrique (ADV, A et B) et des MES (LISST et ASM, C et D) sur la vasière (marée du 09/05/2004, coefficient 77, marnage 7,05 m).

Figure 4.16. *Records of tidal currents (ADV, A and B) and SPM (LISST and ASM, C and D) over the mudflat (09/05/2004, tidal range = 7.05 m).*

2.3. SYNTHESE DES OBSERVATIONS

Les enregistrements sur les sites expérimentaux ont permis de dégager quelques points. On observe des courants de faible intensité sur les marais salés (< à 0,12 $m.s^{-1}$) et des concentrations de sédiments relativement faibles (autour de 200 $\mu l.l^{-1}$). Le diamètre moyen des particules est à peu près constant autour de 50 µm. Si l'on compare les résultats des deux types de marais étudiés, la concentration en MES est plus importante et le sédiment en transit

plus grossier sur les marais à microfalaise. Sur le schorre progradant, l'augmentation rapide de la concentration en MES est corrélée avec des pics de vitesses de courant. Les particules de taille supérieures à 63 µm peuvent être reliée à la présence de macroflocs sur le schorre progradant (300 µm avec des fluctuations) mais en revanche elles seront attribuées à des silts (100 µm de façon constante) sur le schorre adjacent à un chenal de marée.

Sur la vasière, les courants sont aussi très faibles (< à 0,12 $m.s^{-1}$) mais la concentration en MES est bien plus élevée même si leur diamètre moyen est comparable autour de 50 µm. L'augmentation des concentrations de MES sont reliées dans les deux sites à des augmentation de vitesse du courant. On observe une concentration décroissant de MES depuis la vasière jusqu'au marais bien que leur valeur de base au début du flot soit identique. Ce constat atteste de l'efficacité de piégeage des sédiments sur le marais. Dans les deux cas, la présence de particules de diamètre supérieur à 63µm peut être imputée à celle d'agrégats. Leur augmentation sur les marais à la fin du jusant semble être due à la floculation qui opère lorsque la vitesse des courants tend à être négligeable.

Les courants sont modérés dans les chenaux de marée (< à 0,4 $m.s^{-1}$) hormis lors du flot et du jusant où l'écoulement se concentre entre les berges avec une vitesse atteignant 0,4 $m.s^{-1}$. Les concentrations de MES sont plus importantes et les particules plus grossières quand le chenal ne déborde pas. Les concentrations de sédiment sont à un niveau comparable au début du flot dans le chenal de marée et sur le schorre adjacent. On observe cependant une forte augmentation de celles-ci due à l'effet de vidange des hauts niveaux en fin de marée.

Les flux de sédiments observés sont tout à fait différents, tant dans leur intensité que dans leur variation temporelle au cours de la marée (Figure 4.17). Les aires intertidales présentent des valeurs de flux comparables entre elles mais également à un chenal de marée sans débordement associé, dans une gamme atteignant 35 $g.m^{-2}.s.^{-1}$. Les chenaux estuariens sont vecteurs d'une quantité 3 à 6 fois plus importante de sédiments. On remarque aussi que le flot apporte en général plus de sédiment que le jusant. Ce constat doit cependant être nuancé dans le cas des chenaux où les deux phases de la marée semblent être en mesure de se concurrencer. Dans le chenal de marée on peut apercevoir deux évènements au jusant, à travers deux pics de flux de MES. Ces fluctuations sont associées à la présence de particules plus grossières et peuvent être reliées au relargage de sédiments occasionné par l'érosion des berges. Sur la vasière les flux diminuent progressivement au cours de la marée. Malgré tout, ceci va dans le sens d'une balance positive en faveur de l'accumulation de sédiments sur place.

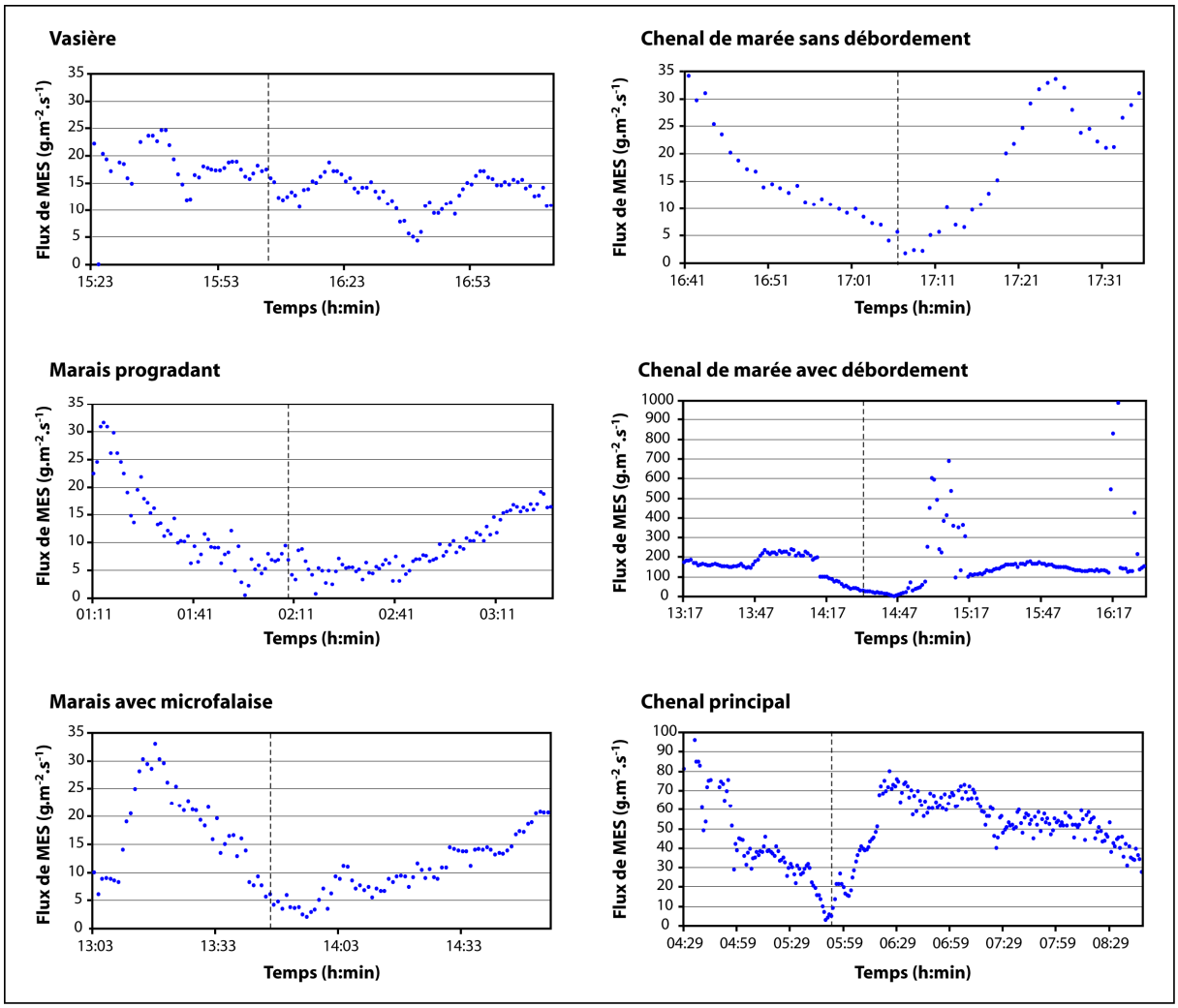


Figure 4.17. Flux de MES en fonction du temps pour les six marées étudiées.

Figure 4.17. *SPM fluxes as a function of time for the six studied tides.*

Il s'agit de milieux où l'énergie exercée par la marée est sensiblement différente. Nous avons reporté les concentrations mesurées à 40 cm en fonction du courant moyen observé à 10 cm (Figure 4.18) afin d'avoir une première estimation de la vitesse de courant qui est capable de remobiliser du sédiment. Ce seuil critique d'érosion se situerai à 0,06 $m.s^{-1}$ sur le marais progradant et la vasière même si sur ce dernier site, la concentration en MES semble augmenter proportionnellement à la vitesse du courant sans véritable palier. Le marais avec microfalaise présente une hystérèse qui peut être mise en relation avec l'activité cyclique du chenal adjacent à travers les phénomènes de débordement et de vidange. Dans les chenaux, les seuils observés sont plus élevés : 0,08 et 0,28 $m.s^{-1}$ respectivement pour le chenal sans ou avec débordement et 1,2 $m.s^{-1}$ pour le chenal principal. Sur les deux derniers graphiques, on peut remarquer qu'il ne s'agit pas à proprement parler d'un seuil car à des vitesses plus élevées, la concentration en MES retrouve des valeurs basses. Ces observations pourraient

s'expliquer par la présence d'éléments plus grossiers en fond de chenal mais également par la complexité du mélange sable/vase.

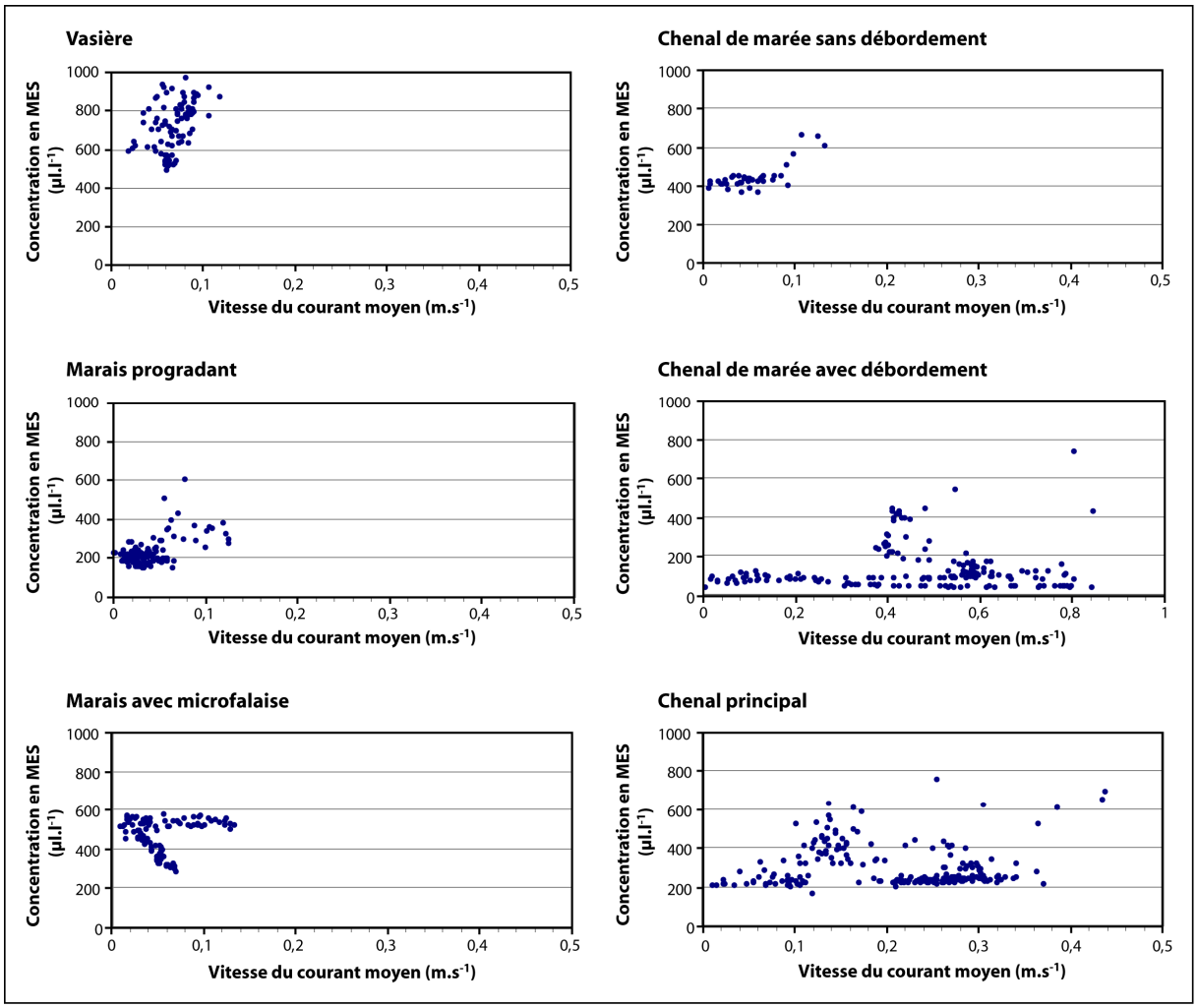


Figure 4.18. Concentration en MES en fonction de la vitesse du courant pour les six marées étudiées.
Figure 4.18. *SPM concentration as a function of mean current velocity for the six studied tides.*

3. ETUDES DES TRANSFERTS DE SEDIMENTS

Deux stations de mesures regroupant un ADV et un ASM ont été déployées au cours d'un cycle tidal semi-lunaire sur la vasière principale de l'estuaire. La première station a été installée au cœur de la vasière, non loin toutefois de la zone pionnière de spartine, tandis que la deuxième se situe dans la partie externe de celle-ci, juste avant la limite de répartition des stocks de sédiments plus grossiers. Les enregistrements regroupant les hauteurs d'eau, la

composition tridimensionnelle du courant ainsi que les flux de MES observés sont présentés en Figure 4.19.

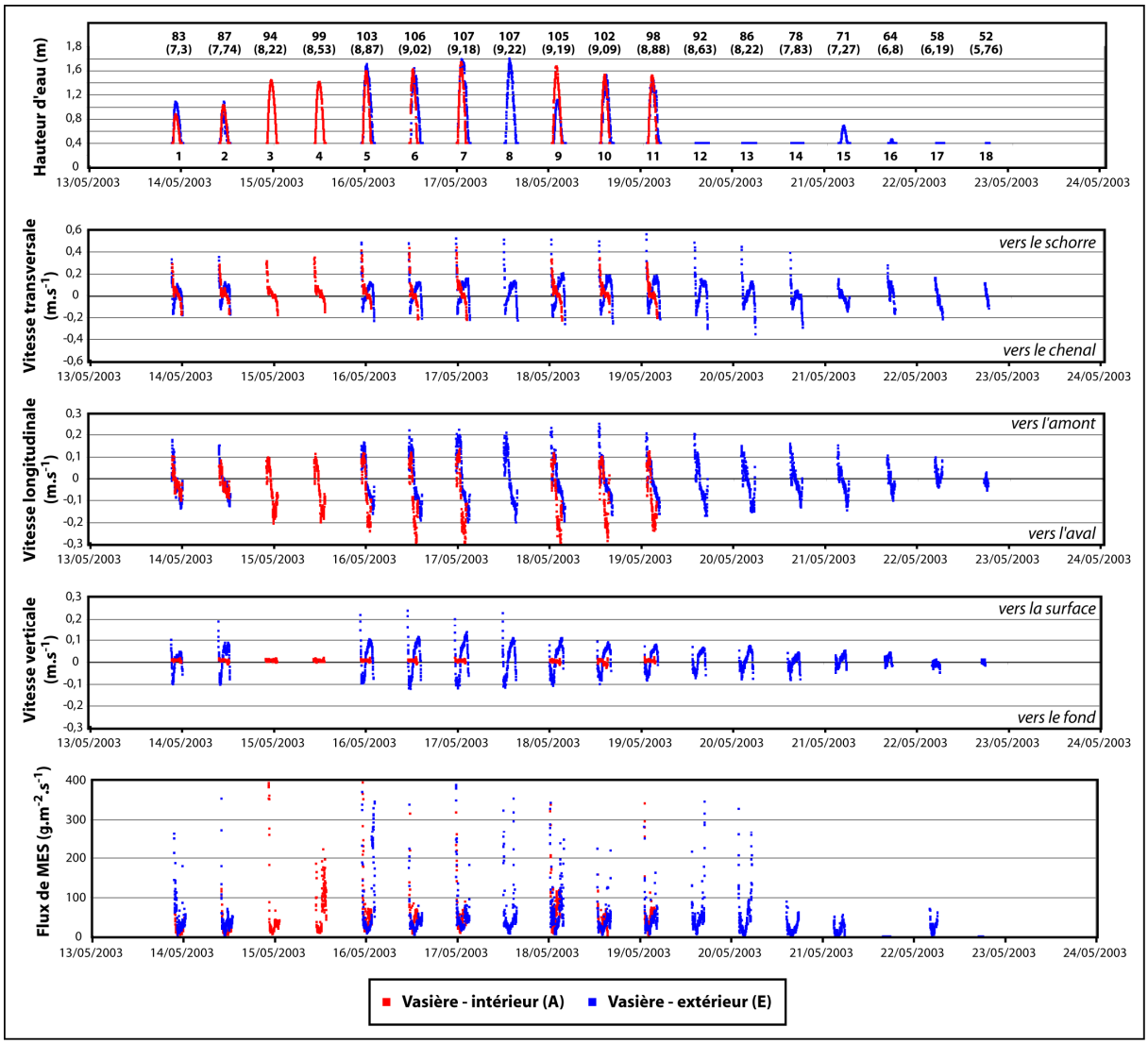


Figure 4.19. Enregistrements courantométriques et des flux de MES sur la vasière principale, à l'intérieur et sur la limite externe (13 au 24/05/2003).

Figure 4.19. *Records of tidal currents and SPM fluxes over the main mudflat (*13 to 24/05/2003*).*

On observe des niveaux d'eau comparables sur les deux stations. La composante transversale domine les courants lors du flot sur l'ensemble des marées observées. La composante longitudinale prédomine lors du jusant à partir d'un marnage de 8,22 m (Figure 4.19) et s'accentue lors des amplitudes tidales les plus fortes liées aux marées d'équinoxes (marée 6 à 10) notamment sur la station située près de la zone pionnière. La vitesse verticale est quasi nulle sur la station proche de la zone pionnière alors qu'elle atteint jusqu'à 0,2 $m.s^{-1}$ sur le

deuxième site d'acquisition. Les fluctuations de cette vitesse au cours de la marée se calquent sur celles de la composante transversale du courant. L'action conjointe de telles vitesses est en mesure de remobiliser une quantité importante de sédiment par l'intermédiaire d'un écoulement turbulent et de l'exporter vers le cœur de la vasière où l'écoulement devient laminaire. Les flux de sédiments mesurés entrent dans la même gamme de valeur quelque soit le site autour de 50 $g.m^{-2}.s^{-1}$ avec des maxima atteignant 400 $g.m^{-2}.s^{-1}$. Les sites se distinguent cependant aux forts coefficients avec une concentration des matériaux en mouvement sur la partie de la vasière en situation proximale par rapport aux marais. Cette forte concentration est associée à des courants faibles ainsi qu'à une distribution favorable de ceux-ci qui permet un bilan sédimentaire en faveur de l'accrétion de la vasière.

Les annexes IV-1 à 3 regroupent les différents profils de concentration de sédiments observés lors de ce cycle semi-lunaire sur les deux stations. Nous avons pris trois exemples de marée en Figure 4.20 qui présentent des marnages croissants afin de détailler quelques processus. Sur la première marée (1), on observe de trois phase d'augmentation légère de la concentration en MES sur la station E localisées en début de flot, peu après l'étale de haute mer et en fin de jusant. Ces mouvements du sédiment n'affectent pas la colonne d'eau en dehors de la zone de turbidité la plus importante ni les concentrations en MES observées à la station A. Sur la deuxième marée (2), on repère également ces trois étapes mais cette fois-ci leur magnitude est beaucoup plus grande et l'augmentation de la concentration touche des niveaux plus hauts de la colonne d'eau (80-90 cm) pour les deux premiers évènements. Ces modifications touchent l'ensemble du profil de concentration à la station A hormis lors de l'étale de haute mer. Sur la dernière marée (5), les pics en concentration de MES sont associés à des mouvements du lit sédimentaire est semblent ainsi clairement reliés à des remises en suspension des sédiments superficiels. Ils se situent en début de flot et fin de jusant. Le même phénomène est observé en début de marée sur la deuxième station.

De manière générale, on remarque que les MES en mouvement se concentrent sur les 30 premiers centimètres de la colonne d'eau quel que soit la hauteur d'eau et le marnage avec des valeurs comprises entre 200 et 300 $mg.l^{-1}$ ce qui confirme les observations réalisées lors des analyses gravimétriques. La station externe est plus sujette aux remobilisations importantes et systématiques de sédiments au flot comme au jusant qui peuvent atteindre le haut de la colonne d'eau observée soit environ 90 cm. Des remises en suspension sont toutefois observables au flot sur la station interne sur quelques marées. Ces différentes observations vont également dans le sens d'une sédimentation importante sur les hauts

niveaux où les remises en suspensions sont moins importantes et où les masses d'eau arrivent avec des concentrations plus élevées dues aux remobilisations effectuées sur leur parcours. L'étale de haute mer est une phase tidale où la sédimentation des particules fines est importante comme l'attestent les faibles concentrations des profils de concentration en MES à cette période.

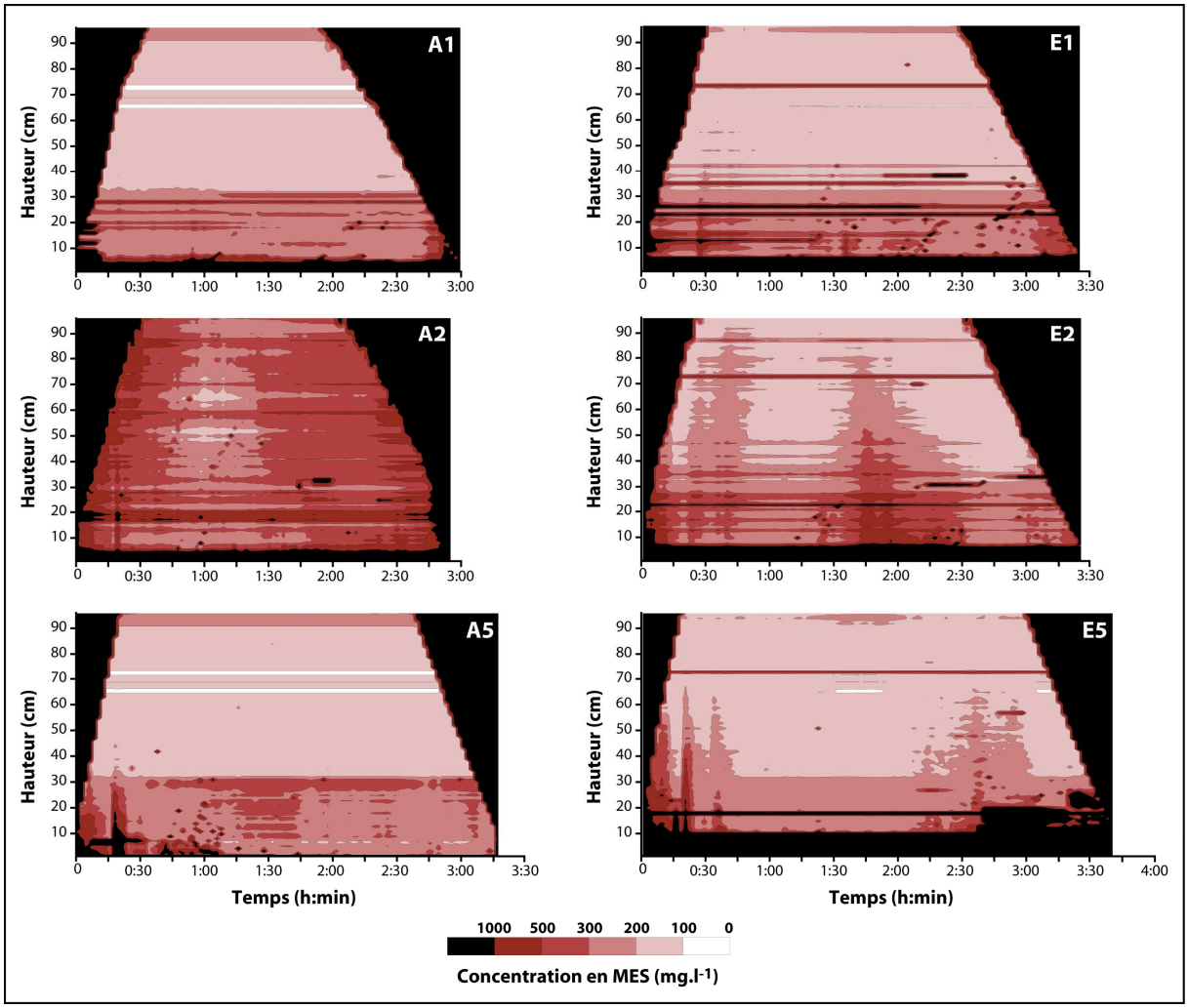


Figure 4.20. Profils de concentration de MES par marée sur un cycle semi-lunaire au centre de la vasière principale (A) et en bordure externe (E) : marée 2, 3 et 5.

Figure 4.20. *SPM concentration profiles by tide over a semi-lunar cycle in mudflat centre (A) and in the external border (E): tide 2, 3 and 15.*

CONCLUSION

Les différentes observations réalisées mettent en évidence des masses d'eau bien mélangées au regard de la salinité mais une ségrégation des MES sur les trente premiers centimètres de la colonne d'eau qui caractériserai un maximum de turbidité lié à la marée dynamique. Les mesures in situ des caractéristiques des MES mettent en évidence la présence importante de macroflocs dans la colonne d'eau des aires intertidales étudiées. Ces structures restent difficilement observables en laboratoire (granulomètre laser) en raison de leur grande fragilité.

Les seuils de remise en suspension ont été estimés autour de 0,06 $m.s^{-1}$ sur les sites dominés par les vases mais peuvent également atteindre des valeurs plus importantes dans le cas des chenaux qui présentent des fonds de sédiments mixtes. Toutefois, l'intensité du courant vertical dirigé vers le fond joue un rôle important dans les remises en suspension observées. L'étale de haute mer apparaît comme une phase de la marée où la sédimentation fine est privilégiée, bénéficiant d'une diminution drastique des vitesses des courants.

L'alternance de la domination de l'écoulement par les composantes longitudinale et transversale tout comme celle de débordement et vidange des chenaux vont dans le sens d'un bilan positif en sédiment des espaces de sédimentation fine, ce qui mène à l'accrétion des vasières et l'élévation des marais.

INTRODUCTION

Les apports en sédiments fins dans la colonne d'eau et leur dépôt sur les marais et les vasières sont soumis à des variations importantes à l'échelle annuelle. Tout d'abord les cycles tidaux entrent en grande partie dans cette variabilité mais des évènements plus ponctuels de forte agitation comme les tempêtes sont également capables d'engendrer de fortes concentrations de sédiments en suspension en remobilisant des stocks importants.

De plus, les apports sur zones intertidales sont fortement dépendants des niveaux altimétriques et, dans le cas de surfaces végétalisées, de la nature de la végétation en place. En effet, les différences observées dans les caractéristiques des appareils végétatifs des différentes espèces pourraient causer des obstacles naturels plus ou moins performants à l'écoulement des masses d'eau chargées en sédiment et donc créer des zones de décantation plus ou moins efficaces.

C'est pour ces raisons que nous avons choisi de travailler sur des stations de suivi implantées dans tous les contextes afin de faire la part des choses.

1. CHOIX DES SITES EXPERIMENTAUX

Les marais salés se sont développés de manière inégale chronologiquement au sein de l'estuaire (Chapitre VI). Ceux situés en rive Nord se sont développés à la fois tardivement et de façon rapide, tout particulièrement dans sa partie occidentale (moins de 50 ans), et présentent également la communauté de *Spartina anglica* la plus importante. Le suivi de paramètres simples peut être pertinent pour comprendre le comportement des stocks sédimentaires (Marion *et al.*, 2005) et important pour la gestion des estuaires, avec une attention particulière sur la zone pionnière et les impacts de *Spartina anglica*. De plus elle présente l'accessibilité la meilleure. Elle a donc été privilégiée pour la mise en place de ce suivi.

Quatre radiales ont été définies: à la limite de répartition des stocks sédimentaires vase/sable (stations P1), sur du schorre progradant (stations P2), sur du schorre présentant une microfalaise d'érosion (stations P4) et sur un chenal de marée présentant un tracé simple (stations P3).

La répartition des filtres prend en compte les différentes communautés végétales qui s'organisent assez simplement en ceintures entrecoupées par l'influence des chenaux de

marée. C'est pourquoi deux profils (4 filtres, stations CH_3 et CH_4) ainsi que deux autres stations ont été ajoutées sur le chenal de marée étudié pour compléter cette acquisition. Les stations sont numérotées de façon croissante du chenal principal vers la dune et de la levée du chenal secondaire vers le coeur du marais. Les flux de sédiments ont été évalués à partir des ESST situés au niveau des premiers filtres des profils P2 et P4 mais également sur le site de la Madelon, à la limite de canalisation de l'estuaire en amont (stations P2, P4 et MA). Pour surveiller l'altimétrie des vasières, le système ALTUS a été déployé sur la berge de l'Authie en rive Nord. Pour les changements d'élévation des marais salés, trois stations RSET ont été implantées sur les profils P2 et P4, sur des niveaux altimétriques et de végétation (spartine, obione, puccinellie) différents (stations P4-3, P4-5 et P2-5). Pendant ces suivis, la topographie des profils a également été relevée régulièrement afin d'évaluer l'évolution morphologique de la zone et éventuellement de mettre en évidence des variations altimétriques. La figure 5.1. répertorie les différentes stations sur les profils.

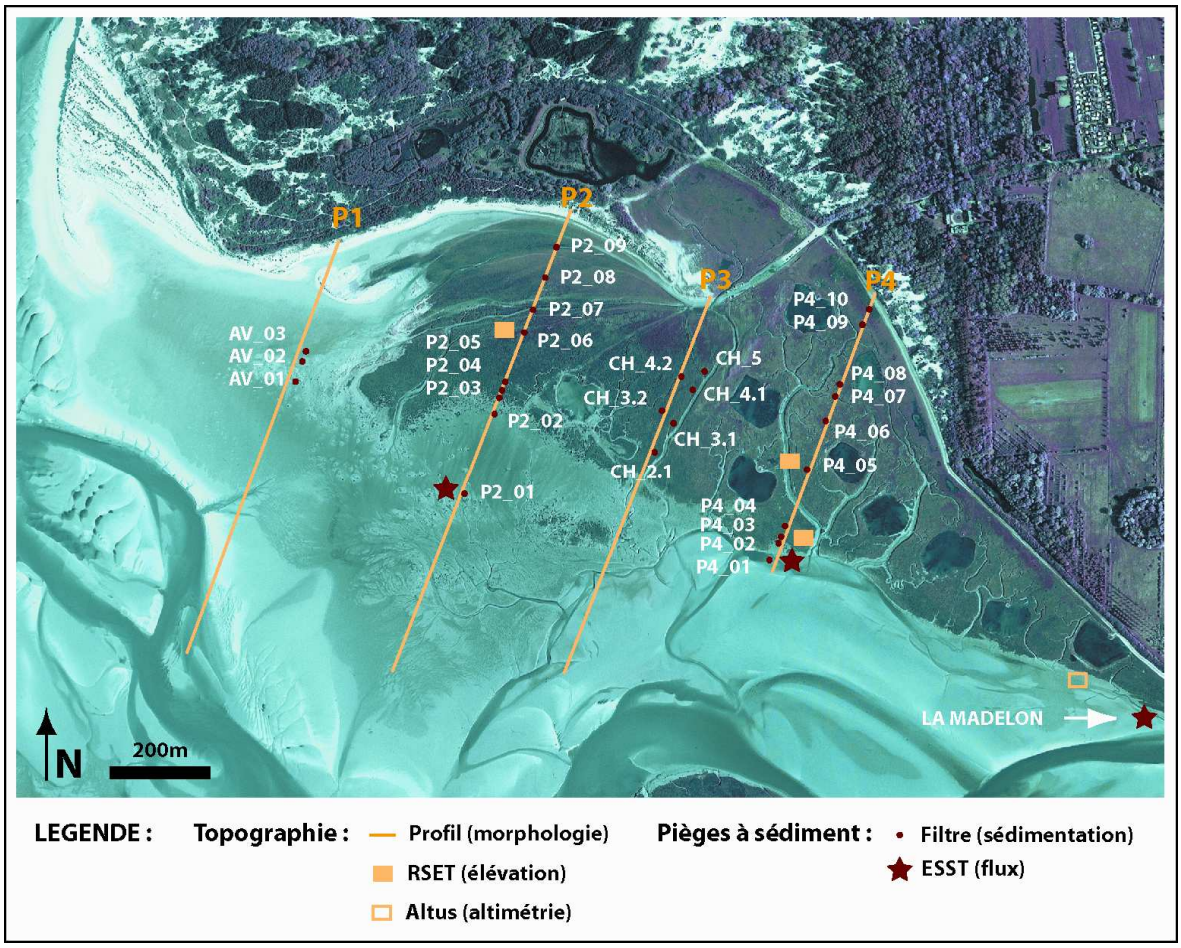


Figure 5.1. Localisation des stations de suivi.

Figure 5.1. *Location of surveyed stations.*

2. FLUX DE MES

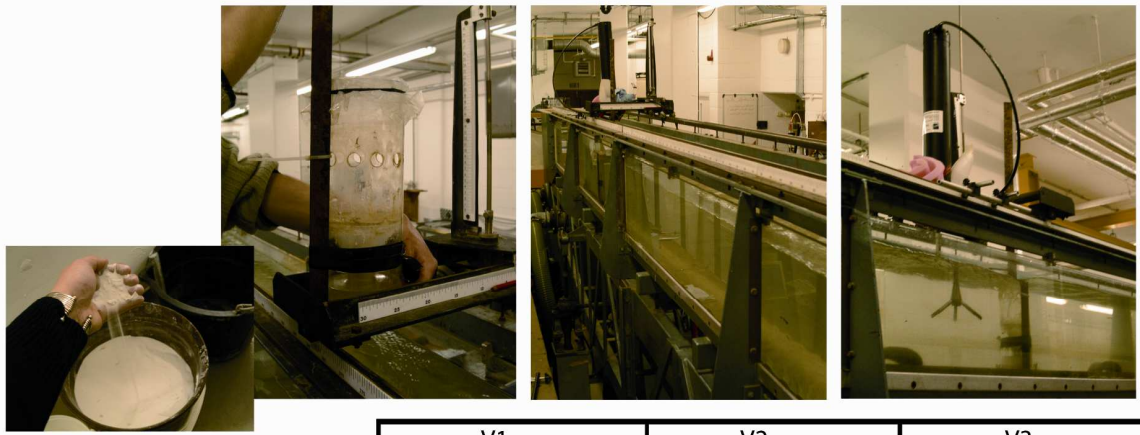
2.1. PRECISIONS SUR LA METHODE

Les stations de équipées de ESST ont permis un suivi des flux de MES. Le ESST a été testé au préalable dans un canal de mesure de l'University of East Anglia (en collaboration avec notre laboratoire et celui de Sussex University) pour trois vitesses d'écoulement et concentrations de sédiment en suspension. Certains effets engendrés par le dispositif comme les variations de la turbulence, de la direction et de la vitesse du flux de la masse d'eau ont ainsi pu être quantifiés (Figure 5.2). Ces expérimentations nous ont servi à calibrer le ESST et notamment à bâtir une équation pour exprimer le flux de sédiment en suspension.

Nous avons obtenu l'équation suivante :

$$F = \frac{\ln S + 4{,}4197}{80{,}625}$$

avec F : flux de MES en $g.m^3.s^{-1}$; S : sédiment collecté par heure d'inondation



	V1	V2	V3
Vitesse de l'écoulement ($cm.s^{-1}$)	14,87	21,82	36,34
Atténuation de l'écoulement	15,42	2,63	2,86
Effet latéral	faible, centrifuge	important, centrifuge	important, centripète
Turbulence	légère augmentation	pas d'effet	diminution

Figure 5.2. Calibration du ESST dans un canal de mesure (University of East Anglia) et effet de différentes vitesses d'écoulement sur le dispositif.

Figure 5.2. *ESST calibration using a re-circulating flume (University of East Anglia) and effects of different flow velocities on the frame.*

2.2. RESULTATS

Des laminations ont pu être observées sur certains cycles dans le tube de collection. Leur préservation est cependant fortement dépendante de l'activité biologique au sein des tubes de collection. La Figure 5.3 présente le même cycle semi-lunaire bien conservé sur les trois stations d'observation. On remarque une alternance assez bien marquée de lamines claires et sombres. Le ESST MA le plus en amont et le plus bas topographiquement est dominé par les lamines claires qui ont été reliées à des silts alors que les deux autres sont dominés par des lamines plus sombres attribuées à des sédiments argileux. L'absence d'une série importante de telles observations ne nous a raisonnablement pas permis d'en faire une analyse quantitative.

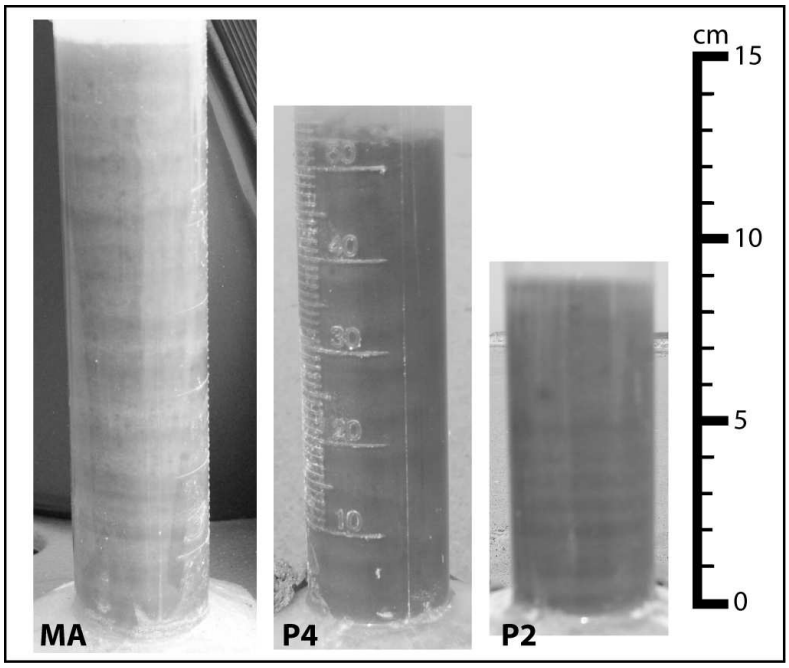


Figure 5.3. Lamines observées dans le sédiment récolté par le cylindre du ESST sur les trois stations pendant un cycle semi-lunaire d'avril 2004.

Figure 5.3. *Laminations observed in collected sediment by ESST chamber for the three stations during one April 2004's semi-lunar cycle.*

La quantité de sédiment récoltée est très variable selon les stations et les cycles observés (Figure 5.4). Sur la période étudiée, elle atteint respectivement 14,4 ±7,63 g pour la station P2, 51,44 ±18,55 g pour la station P4 et 52,99 ±21,16 g pour la station MA.

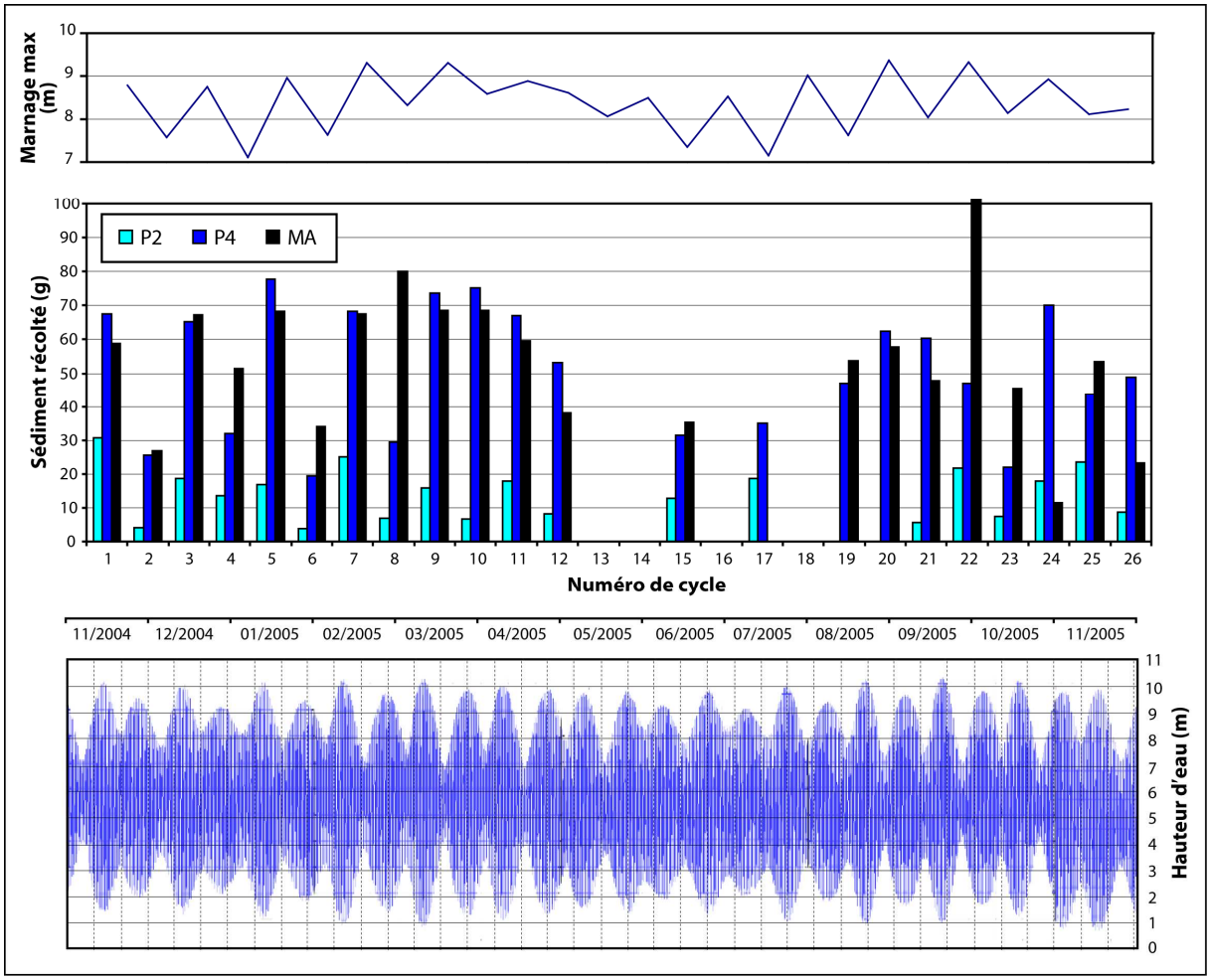


Figure 5.4. Sédiment récolté sur chaque station par cycles observés sur un an.

Figure 5.4. *Collected sediment at each station for observed cycles during one year.*

Le taux de sédiments piégés et le niveau altimétrique des stations ne sont pas très clairement reliés. En revanche les corrélations sont bien meilleures avec le marnage, avec des coefficients de 0,45 (P2), 0,73 (P4) et 0,48 (MA). Les acquisitions sur la station P4, de bas niveau et en position intermédiaire au niveau de l'estuaire interne, reflètent bien mieux les différences de marnage.

Les flux moyens de sédiments en suspension ont été estimés à $0,0373 \pm 0,0075$ g.m^{-3}.s^{-1} ($2,238 \pm 0,45$ g.m^{-3}.h^{-1}) pour la station P2. Ils augmentent sensiblement sur les deux dernières stations où ils atteignent des valeurs similaires : $0,0577 \pm 0,0045$ g.m^{-3}.s^{-1} ($3,462 \pm 0,27$ g.m^{-3}.h^{-1}) pour P4 et $0,0577 \pm 0,0060$ g.m^{-3}.s^{-1} ($3,462 \pm 0,36$ g.m^{-3}.h^{-1}) pour MA.

3. APPORTS SUR LES MARAIS

3.1 PRECISIONS SUR LA METHODE

Les apports sur les marais ont pu être évalués lors d'un suivi par le biais d'un large déploiement de systèmes de porte-filtres dans différents contextes. Sur le profil P1, les 3 filtres des stations AV ont été rapidement abandonnés en raison de la dynamique sableuse trop importante liée au transport éolien. Le suivi a été poursuivi avec 9 filtres sur le profil P2 qui montre un schorre progradant en zone pionnière et par 10 filtres le long du profil P4 qui présente une microfalaise d'érosion.

Avant de détailler plus amplement les résultats, nous avons voulu préciser les durées théoriques d'inondation respectives pour chaque station et pour chaque cycle semi-lunaire étudiés grâce au logiciel PREDIT du SHOM. Cette série de données complémentaire nous permet dans un premier temps de cadrer la représentativité de nos observations mais surtout d'exprimer ensuite les taux de sédimentation en fonction de l'hydropériode. Les durées d'inondation moyennes par station pour un cycle semi-lunaire sont représentées en Figure 5.5. On peut remarquer que les hydropériodes moyennes sont comprises entre 10 et 50 h et que plus les stations sont élevées, plus leurs variations sont importantes. En raison des faibles durées d'inondation (inférieures à 5 h par cycle semi-lunaire) et donc des faibles quantités de sédiments déposés, des stations ont été écartées des analyses comparatives et seules les 6 premières stations ont été retenues sur chaque radiale.

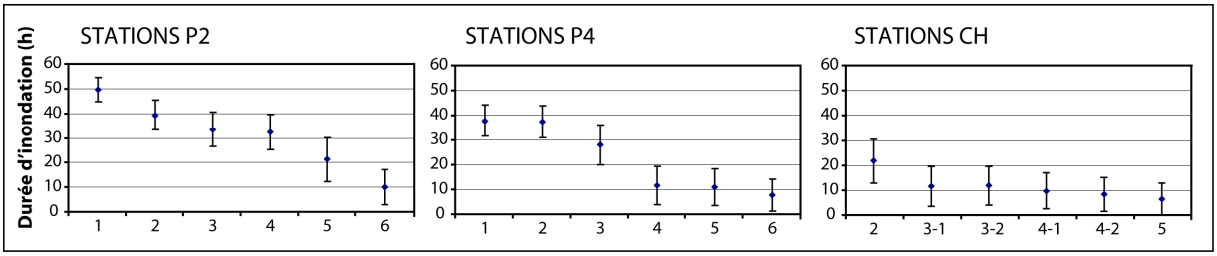


Figure 5.5. Hydropériode théorique moyenne par station.

Figure 5.5. *Averaged theoretical hydroperiod at each station.*

L'hydropériode est le reflet direct de l'altitude des stations d'une part et montre une forte corrélation avec le marnage le plus fort pendant le cycle d'autre part. Les corrélations entre ces deux derniers facteurs varient en effet entre 0,84 et 0,94 toutes stations confondues. Après un codage semi-quantitatif représentatif de la végétation en place pour chaque station, la corrélation avec le niveau altimétrique est égale à 0,85 ce qui confirme la relation étroite entre le niveau topographique et l'installation des différentes espèces halotolérantes.

3.2. RESULTATS

Une expérience a été menée sur un cycle semi-lunaire pour estimer la remise en suspension éventuelle des sédiments selon les stations. Pour cela, un dispositif de mesure supplémentaire a été installé par station et relevé après chaque marée pendant tout un cycle. Les résultats sont présentés en Figure 5.6. On observe une remise en suspension sur toutes les stations des deux profils hormis les deux premières. Ce phénomène est moins important sur les stations les plus élevées et/ou ayant la couverture végétale la plus importante et/ou l'agitation la plus faible. Elle excède 50 % sur les stations de la zone pionnière à spartine où il ne reste respectivement que 45,75 % (P2-2) et 25,65 % (P4-2) des sédiments réellement déposés alors que les ceintures monospécifiques de spartine qui lui succèdent semblent être les plus exemptes d'un tel phénomène (71,95 % pour P2-3 et 85,51 % pour P4-3). La quantité de sédiments collectée lors du demi-cycle montant (mortes-eaux - vives-eaux) est systématiquement toujours nettement inférieure à celle déposée au demi-cycle descendant (vives-eaux - mortes-eaux), à l'exception des deux stations les plus élevées où les deux valeurs restent très proches et où le premier demi-cycle peut s'avérer dominant (P2-5). Pour toutes les autres stations, le cycle descendant contribue au-delà de 60 % à la quantité totale de sédiment déposé sur le cycle avec un maximum observé de 75 %.

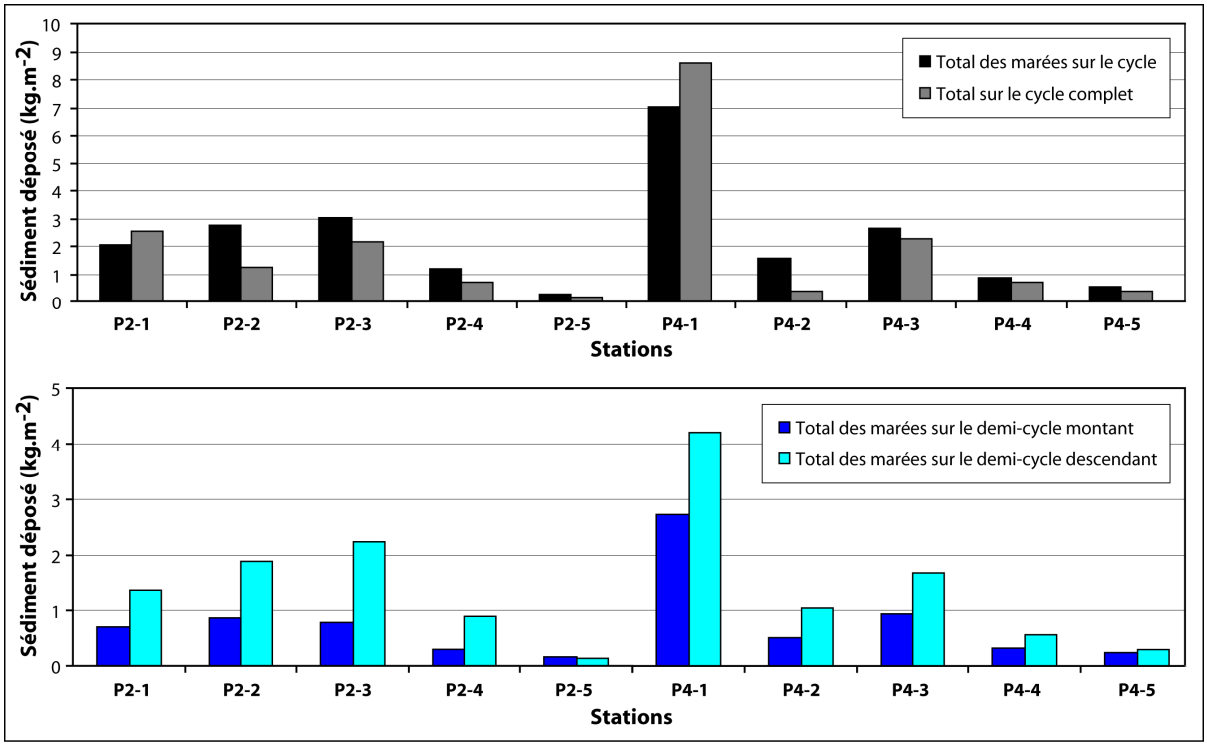


Figure 5.6. Comparaison des résultats par addition des marées (sur le cycle complet et les deux demi-cycles montant et descendant) et des résultats totaux sur le même cycle semi-lunaire.

Figure 5.6. *Comparison of data with cumulative tides (over the complete cycle and on the two semi-cycles,* neap to spring tide and spring to neap tides*) and of total data over the same semi-lunar cycle.*

Il semblerait donc que la morphologie des deux profils joue un rôle essentiel sur les remises en suspension. Elles semblent être nettement plus importantes sur les zones pionnières proches de la microfalaise d'érosion et peuvent certainement être mises en relation avec le débordement du chenal où les vitesses de cisaillement sur le fond vont pouvoir atteindre pendant une courte durée des valeurs très importantes. Cette remise en suspension est en mesure de réinjecter une quantité importante de sédiment dans la colonne d'eau.

Les taux de sédimentation annuels varient entre 1,8 et 80,7 $kg.m^{-2}$ sur les stations observées (Figure 5.7). Le profil P2 montre les taux de sédimentation les plus élevés et une décroissance des valeurs avec l'altitude. Le profil P4 montre une sédimentation très élevée sur la première station puis des valeurs plutôt faibles sur les trois suivantes. La sédimentation observée sur la ceinture monospécifique de spartine est comparable à celle de son homologue du profil P2 (21,3 $kg.m^{-2}$ pour P4-3 et 21,8 $kg.m^{-2}$ pour P2-3). En revanche, en comparant avec les stations P2, le taux de sédimentation dans la zone pionnière est 4 fois plus faible (10 $kg.m^{-2}$ pour P4-2 contre 41 $kg.m^{-2}$ pour P2-2) et celui de la zone plurispécifique en arrière de la spartine est 3 fois inférieur (5,4 $kg.m^{-2}$ pour P4-4 contre 17,8 $kg.m^{-2}$ pour P2-4). Concernant les stations CH, on peut observer que la sédimentation totale est plus importante

sur la bordure du chenal et que, inversement aux tendances observées sur les autres profils, les stations situées à la tête du chenal (et donc à des altitudes supérieures) montrent des taux plus élevés que celles situées près de l'exutoire.

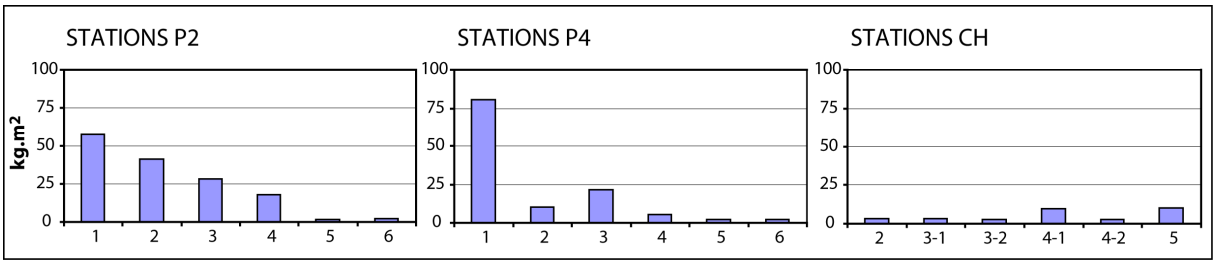


Figure 5.7. Taux de sédimentation annuel observé par station.

Figure 5.7. *Annual sedimentation rates observed at each station.*

Les taux de sédimentation moyens par cycle semi-lunaire notamment exprimés en fonction de l'hydropériode (Figure 5.8) permettent d'expliquer certaines des différences relevées précédemment. On voit ainsi que la sédimentation par heure d'inondation est plus importante que la sédimentation totale sur toutes les stations à l'exception de P2-1 et P2-4 et qu'elles sont quasi-équivalentes sur les stations P2-2, P2-4 et CH2. Les plus grosses différences entre ces deux résultats sont observées sur les stations P4-3, CH3-1, CH4-1 et CH5. Elles pourraient être expliquées chacune par la proximité d'un chenal.

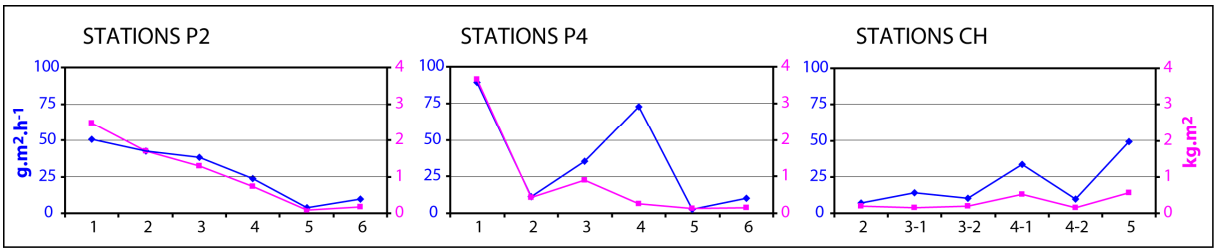


Figure 5.8. Taux de sédimentation moyen observé par station par cycle semi-lunaire.

Figure 5.8. *Averaged sedimentation rate observed at each station over a semi-lunar cycle.*

Les taux de sédimentation par station ont été ensuite corrélés au marnage (i.e. plus fort marnage du cycle semi-lunaire étudié) et à l'hydropériode. Les valeurs de corrélation entre la quantité de sédiment déposée (en $kg.m^2$) et les deux dernières variables sont très logiquement voisines (Annexe V-1). Nous avons choisi d'analyser de façon préférentielle les corrélations entre le marnage (donnée très accessible) et les taux de sédimentation. Nous pouvons ainsi

observer plusieurs tendances. Les corrélations sont plutôt homogènes sur les stations CH et s'étirent entre 0,37 et 0,69. Sur le profil P4, les corrélations sont encore plus fortes (de 0,51 à 0,71) à l'exclusion des stations P4-2 et P4-3, respectivement 0,31 et 0,15. Le profil P2 montre des corrélations très faibles (de 0,30 à 0,40) avec trois stations possédant des valeurs encore inférieures : P2-1 (0,09), P2-3 (0,15) et P2-4 (0,10). Il s'agit de stations recouvertes par de la spartine pour les deux premières et par une communauté dominée par l'aster pour la dernière. Les stations P4-2 et P2-2 dites de la zone pionnière présentent des valeurs de corrélations quasi-identiques sur les deux profils.

Nous avons ensuite réalisé une étude diachronique des taux de sédimentation sur les cycles semi-lunaires étudiés. On peut noter que la sédimentation varie fortement dans le temps sur une même station. Un exemple en est donné en Figure 5.9 qui présente les résultats obtenus sur quatre cycles consécutifs. Ainsi, les tendances esquissées pour les analyses par station ne sont pas obligatoirement observables en prenant un cycle isolément.

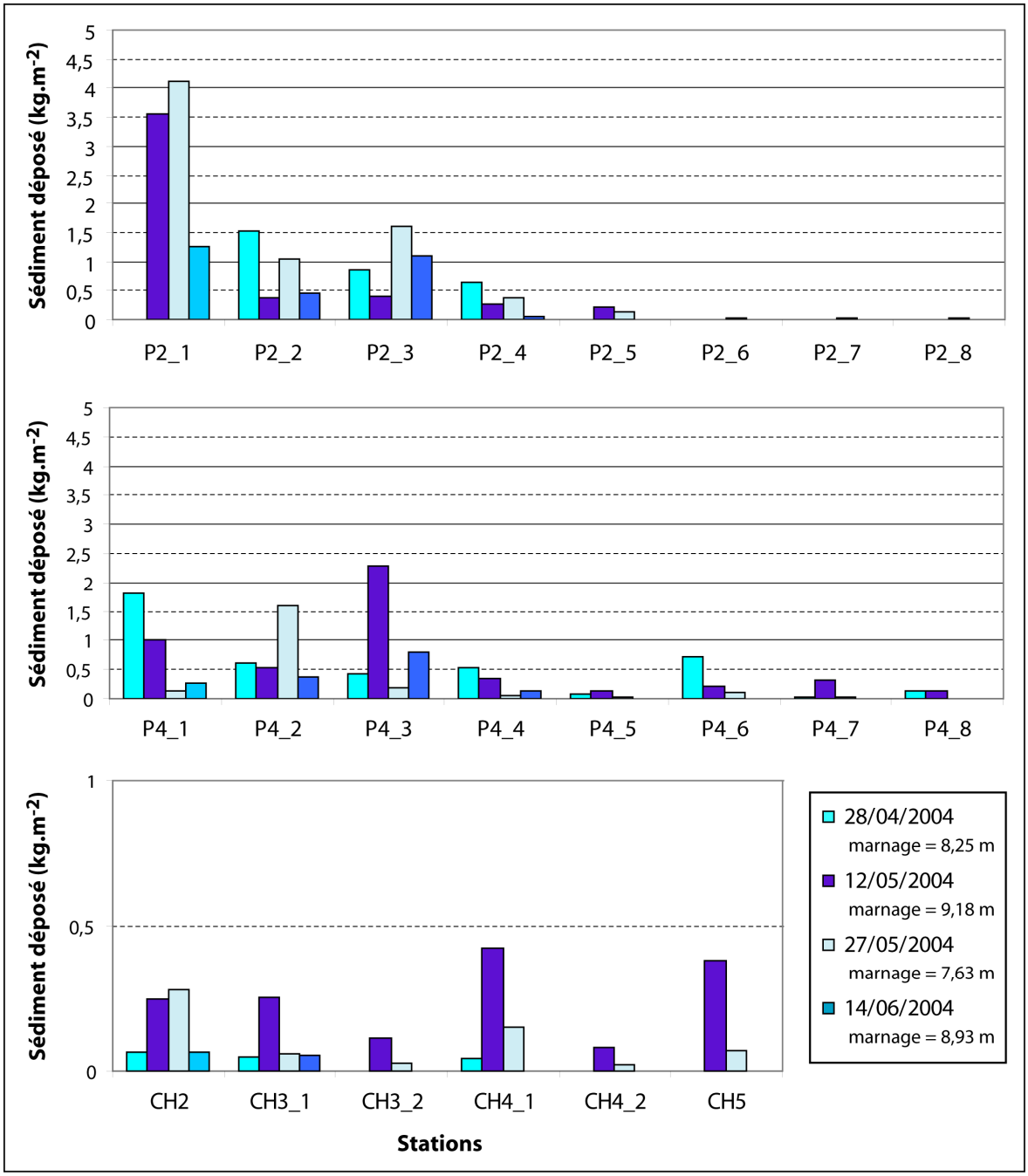


Figure 5.9. Taux de sédimentation observés sur les stations pendant quatre cycles semi-lunaires consécutifs.

Figure 5.9. *Sedimentation rates observed at the stations over four consecutive semi-lunar cycles.*

Nous nous sommes donc attardés sur les corrélations, existantes ou non, entre le taux de sédimentation, l'altitude et la végétation en place pour chaque cycle sur un total de 28 cycles étudiés de novembre 2004 à novembre 2005 en raison présence d'une lacune de données très limitée. Les résultats sont présentés en Figure 5.10. On remarque tout d'abord que les valeurs de corrélation sont assez fortes entre ces différentes variables, la plupart du temps supérieure à 0,5 et atteignant jusqu'à 0,89. Les corrélations entre le taux de

sédimentation et l'altitude (VAR1xVAR3) d'une part et la couverture végétale (VAR2xVAR3) d'autre part sont alternativement plus élevées l'une par rapport à l'autre. Il apparaît ainsi une sorte de cyclicité pendant l'année d'étude. Tout d'abord une première phase où la corrélation à l'altitude domine jusqu'à mars. Ensuite, une période où la corrélation à la végétation est supérieure jusqu'en mai. De nouveau, un cycle similaire au premier jusqu'en août avec cependant des valeurs plus élevées. Puis une phase identique à la seconde avec des valeurs plus importantes également. Ces variations pourraient être mis en relation avec une certaine saisonnalité : la cyclicité de la marée et l'alternance des marées équinoxiales mais également les différents états de l'appareil végétatif des communautés en place. La spartine subit ainsi de grands changements au cours de l'année et sa sénescence en hiver pourrait expliquer à elle seule les corrélations très faibles de la variable 2 et 3 à cette période.

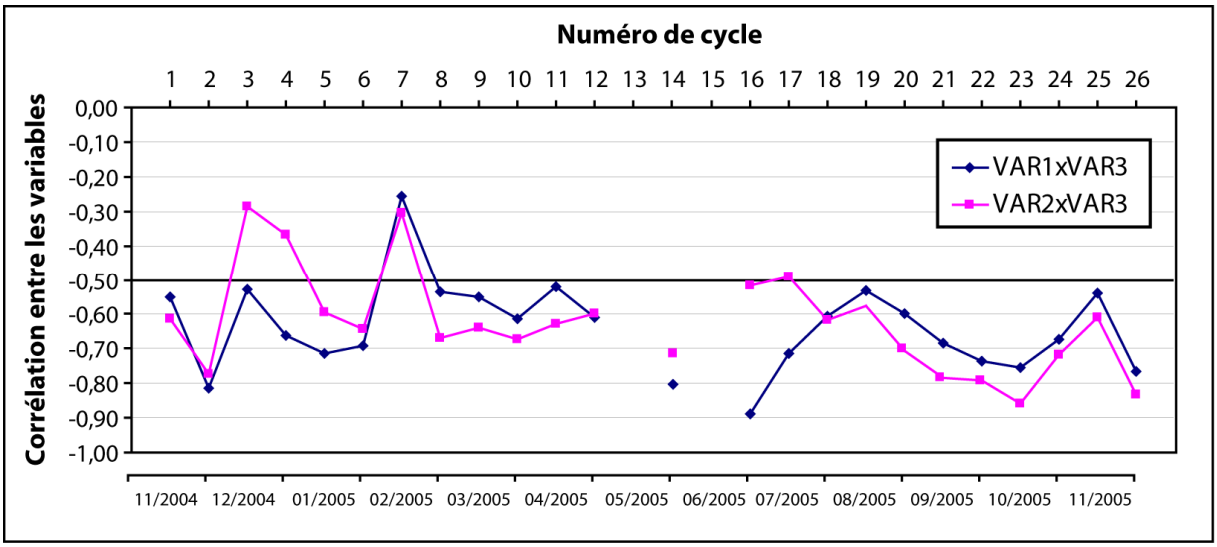


Figure 5.10. Corrélations observées entre la quantité de sédiment déposé (VAR3) et l'élévation d'une part (VAR1) et la végétation en place d'autre part (VAR2) pour chaque cycle semi-lunaire sur une année.

Figure 5.10. *Correlations observed between deposited sediment (VAR3), and elevation on one hand (VAR1) and vegetation types on the other (VAR2) for each semi-lunar cycle during one year.*

Pour cette même période, les sédiments récoltés sur le filtre de la première station de chaque profil ont été mis en relation avec les flux observés de sédiment en suspension par cycle semi-lunaire. Les corrélations observées sont de 0,51 et de 0,42 pour les stations P2 et P4. On peut en conclure que la quantité de sédiment dans la colonne d'eau n'est pas déterminante sur l'apport en sédiment à la surface du marais.

4. ACCRETION D'UNE VASIERE INTERNE

4.1. PRECISIONS SUR LA METHODE

Les mesures d'accrétion d'une vasière interne ont été effectuées à haute fréquence par un altimètre ALTUS. Un autre instrument déployé sur la vasière principale a malheureusement été vandalisé ce qui nous a privé de la possibilité d'une intercomparaison sur le site. Une étude complète en cuve expérimentale au laboratoire a été menée par Deloffre (2005) afin de mesurer les erreurs induites par les variations de température et de salinité ; celles-ci ont en effet une grande influence sur la vitesse de propagation du son dans l'eau et donc sur la mesure par l'Altus. Cette vitesse est fixée initialement pour chaque appareil à 1478 $m.s^{-1}$, correspondant à une eau douce à 19°C. Cependant l'absence de réseau de surveillance des masses d'eau en Authie n'a pas permis de calibrer la réponse de l'Altus en post-traitement comme cela a pu être fait sur d'autres sites (Seine notamment).

4.2. RESULTATS

Les enregistrements montrent une sédimentation continue sur cette vasière (Figure 5.12). Elle s'élève à 26 cm sur les deux années étudiées soit 13 $cm.an^{-1}$. Bien que continue, l'accrétion n'est toutefois pas complètement régulière et quelques différences dans le rythme d'accrétion peuvent être observées au cours du temps.

Tout d'abord, on observe une phase d'accrétion rapide jusqu'en décembre 2003 avec une sédimentation évaluée à 0,65 $mm.jour^{-1}$. Cette période est entrecoupée d'une phase d'accrétion très rapide de 1,02 $mm.jour^{-1}$. Il s'ensuit une période de plus lente accrétion de 0,26 $mm.jour^{-1}$ puis une phase relativement stable. Cette apparente stabilité qui dénote avec les observations précédentes pourrait être imputée à l'outil utilisé. Du fait de son implantation à faible profondeur, le dispositif peut être assujetti à un certain enfoncement dans le substrat qui pourrait être favorisé par exemple par une forte pluviosité associée aux périodes de submersion mais aussi par une dégradation extérieure (chose assez courante sur le site). A cette échelle de temps, la sédimentation de cette vasière ne semble pas perturbée par des épisodes de type érosif.

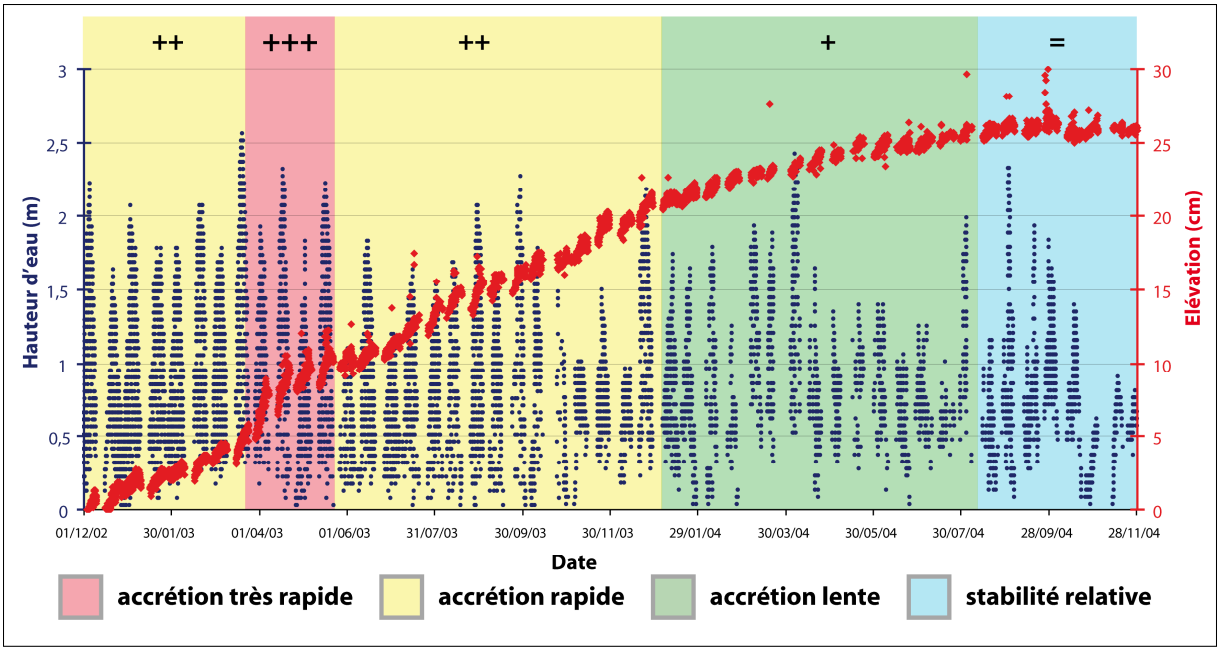


Figure 5.11. Enregistrement quasi-continu de la sédimentation sur la vasière pendant deux ans (du 01/11/02 au 23/01/04).

Figure 5.11. *Quasi-continuous sedimentation record on a mudflat over two years (from 01/11/02 to 23/01/04).*

Cet enregistrement est composé de plusieurs unités de dépôt. La première observée à grande échelle est le cycle lunaire de mortes eaux-vives eaux (28 jours). En zoomant sur cette unité sédimentaire, on distingue les deux cycles semi-lunaires qui la composent (Figure 5.12).

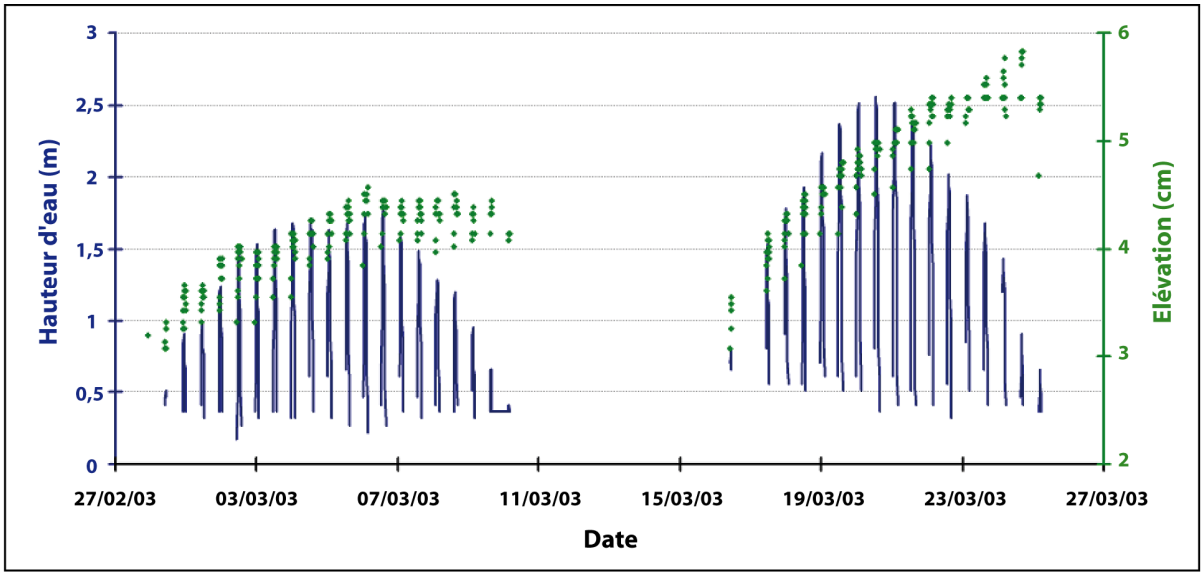


Figure 5.12. Sédimentation de la vasière au cours d'un cycle lunaire.

Figure 5.12. *Mudflat sedimentation during a lunar cycle.*

Pour chacun de ces cycles, on note que la sédimentation progresse au cours des coefficients montants puis on observe une stabilisation et/ou faible érosion des dépôts. Pour la majorité des cycles semi-lunaires observés, il en résulte un bilan d'accrétion positif pour la vasière (35 mm en moyenne). La sédimentation de la vasière est clairement gouvernée par la dynamique tidale. Le marnage et le dépôt de sédiment sont ici étroitement reliés avec une corrélation de 0,78 (Figure 5.13). Le taux de sédimentation annuel très élevé est le résultat de l'accumulation nette réalisée au cours de chaque cycle semi-lunaire.

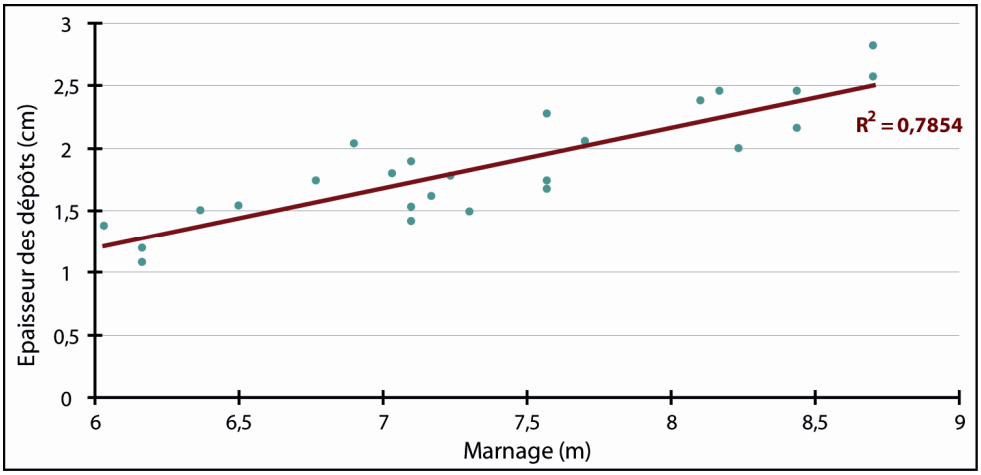


Figure 5.13. Relation entre épaisseur des dépôts et marnage.

Figure 5.13. *Relation between deposition thickness and tidal range.*

5. CHANGEMENT D'ELEVATION DU SCHORRE

5.1. PRECISIONS SUR LA METHODE

Le RSET a été utilisé pour quantifier les changements d'élévation du schorre sur des stations présentant des types de végétation et des altitudes différentes. Quatre stations ont été initialement implantées mais suite à de nombreuses dégradations sur l'une d'entre elle, seules trois séries de données ont pu être exploitées : station P2-5 (puccinellie), station P4-3 (spartine) et P4-5 (obione). Les résultats ont été obtenus en moyennant les 72 points de mesure par stations sur une surface d'environ 1 m^2.

5.2. RESULTATS

De façon générale, les relevés montrent un changement cumulatif d'élévation positif sur toutes les stations sur la période étudiée (Figure 5.14). Cette variation a été évaluée entre 0,25 et 1 cm pour des périodes de 4, 8 et 12 mois. Le taux de sédimentation est quant à lui estimé par cette technique à 7,6 mm.an^{-1} pour le station P4-3, 7,1 mm.an^{-1} pour P4-5 et 7,4 mm.an^{-1} pour P2-5. Ces valeurs sont assez voisines malgré la variété de couverture sédimentaire et d'élévation.

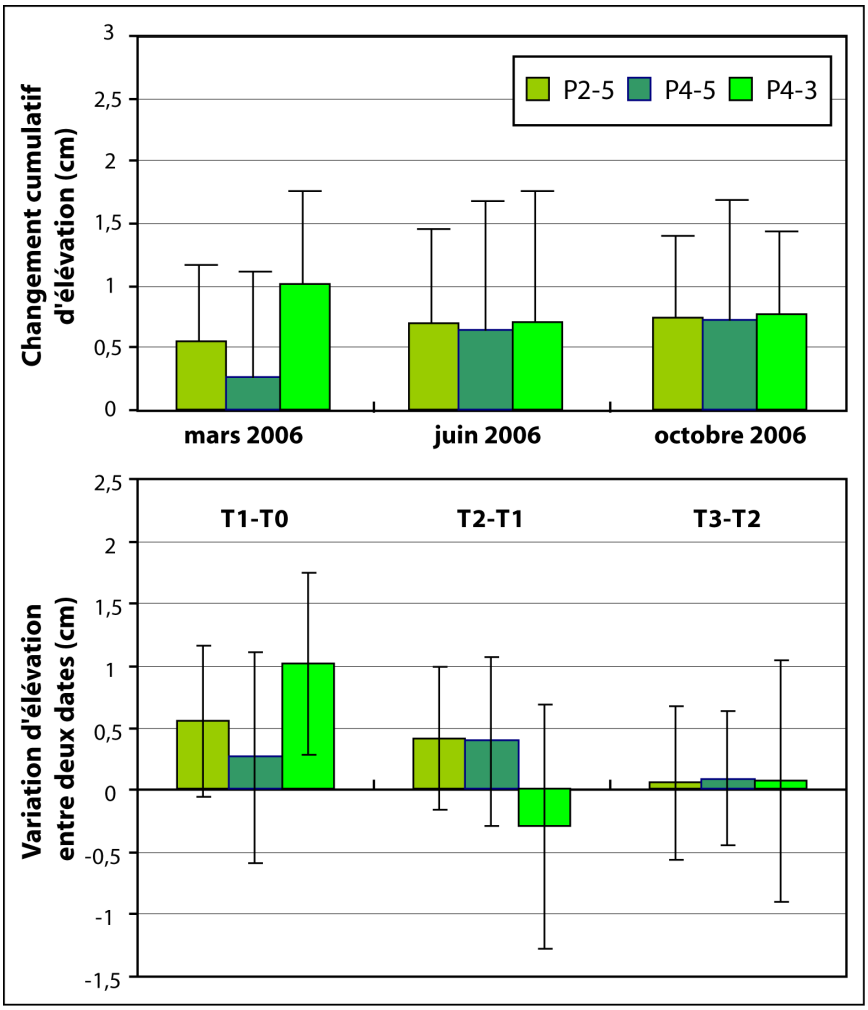


Figure 5.14. Changements d'élévation sur trois stations du schorre.

Figure 5.14. *Elevation changes on three salt marshes stations.*

On remarque que le changement d'élévation se fait graduellement sur les stations de moyen schorre P2-5 et P4-5 avec cependant une plus grande accumulation réalisée sur la première station entre novembre 2005 et mars 2006. Seule la station P4-3 montre une phase d'érosion

de 3 mm entre mars et juin 2006. Cela peut s'expliquer par la sénescence avancée des tiges de spartine à cette époque de l'année qui rend le substrat de ces zones particulièrement sensibles à l'érosion. L'arrachement du sol dû aux structures racinaires qui assurent alors une moindre cohésion est observable notamment aux grandes marées du printemps.

Une stabilisation des sédiments par la spartine a également été démontrée dans un contexte macrotidal par Gray *et al.* (1997) sur l'estuaire Humber. Cette stabilité reste cependant également relative aux stades végétatifs de celle-ci et montre donc une certaine saisonnalité (Figure 5.15).

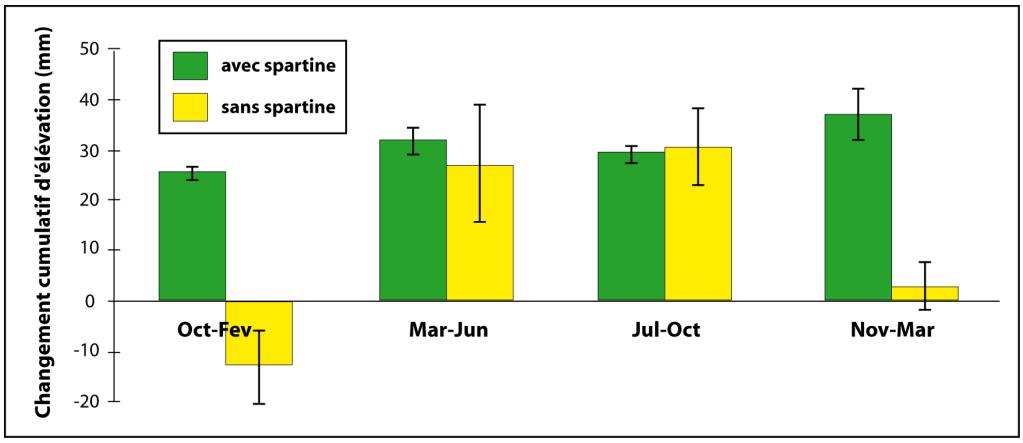


Figure 5.15. Comparaison des variations d'altitude entre des zones à spartine et des zones dépourvues de spartine, estuaire Humber (Gray *et al.*, 1997).

Figure 5.15. *Comparison of elevation changes between Spartina areas and bare sediment, Humber estuary (Gray et al., 1997).*

Cette stabilisation du substrat a été observée en Authie à des échelles de temps plus courtes (Figure 5.16) (Marion, 2002). Sur la première partie du cycle semi-lunaire, en coefficients montants, la quantité de sédiment déposé est généralement faible. La zone sans spartine enregistre alors une légère érosion alors que la station B2 reste stable. Après un cycle semi-lunaire, les deux stations ont gagné en accrétion, avec une progression cependant plus forte pour la zone colonisée par la spartine. On observe ainsi une accumulation progressive après un cycle lunaire sur la station B2 et de nouveau une érosion sur la station B1. La spartine semble ainsi maintenir les apports de sédiments de façon efficace à l'interface schorre-vasière.

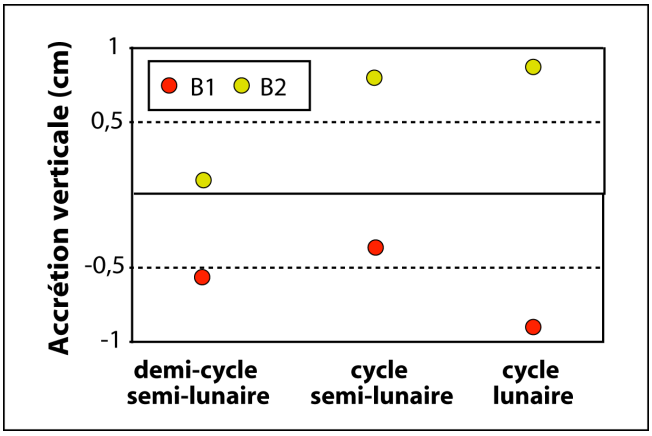


Figure 5.16. Accrétion sur un cycle lunaire et ses composantes pour deux stations, avec (B2) et sans (B1) spartine.

Figure 5.16. *Accretion over a lunar cycle and its components* for station with (B2) and without (B1) *Spartina.*

6. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE

6.1. PRECISIONS SUR LA METHODE

Les relevés topographiques ont été réalisés à partir de stations géoréférencées situées dans la dune et selon le même angle. La précision des mesures est inférieure à 3 cm mais reste plus conséquente en comparaison des outils précédemment utilisés. Ces profils nous permettent cependant une quantification des changements morphologiques de la zone d'étude.

6.2. RESULTATS

L'évolution des profils P1, P2 et P3 est présentée en Figure 5.17. La composition sédimentologique de cette zone a été précisée dans le Chapitre III et explique en partie les variations observées.

Les dunes bordières et embryonnaires en haut du profil P1 sont en forte accrétion, favorisée par les apports éoliens conséquents sur cette zone (Dobroniak, 2000). On remarque ensuite une accrétion générale d'environ 20 cm sur l'estran pendant la période d'étude, entre les niveaux de PMVE et de PMME. Cette plage estuarienne est composée de sédiments silto-sableux. Ce sédiment est plus facilement remobilisé par les courants de marée, notamment par charriage sur le fond. Le bas du profil a été très fortement modifié dans le temps comme le rapportent les différentes observations. Cette mobilité importante peut être mise en relation

avec la dynamique des nombreux bancs sableux situés dans cette partie de l'estuaire et au forçage réalisé par le chenal principal. Ces bancs servent notamment d'espaces temporaires de stockage qui permettent ensuite de larges redistributions sur les plus hauts niveaux lors des marées de vives-eaux (Dobroniak et Anthony, 2002 ; Marion, 2002).

Les variations topographiques des profils P2 et P3 entrent dans les marges d'erreur inhérentes à la méthode. Le sédiment est ici beaucoup plus fin, composé de silts et d'argiles. On distingue cependant une évolution morphologique significative en bas d'estran sur le profil P2 qui elle aussi peut être attribuée à l'action du chenal principal mais également à une granulométrie plus importante à ce niveau.

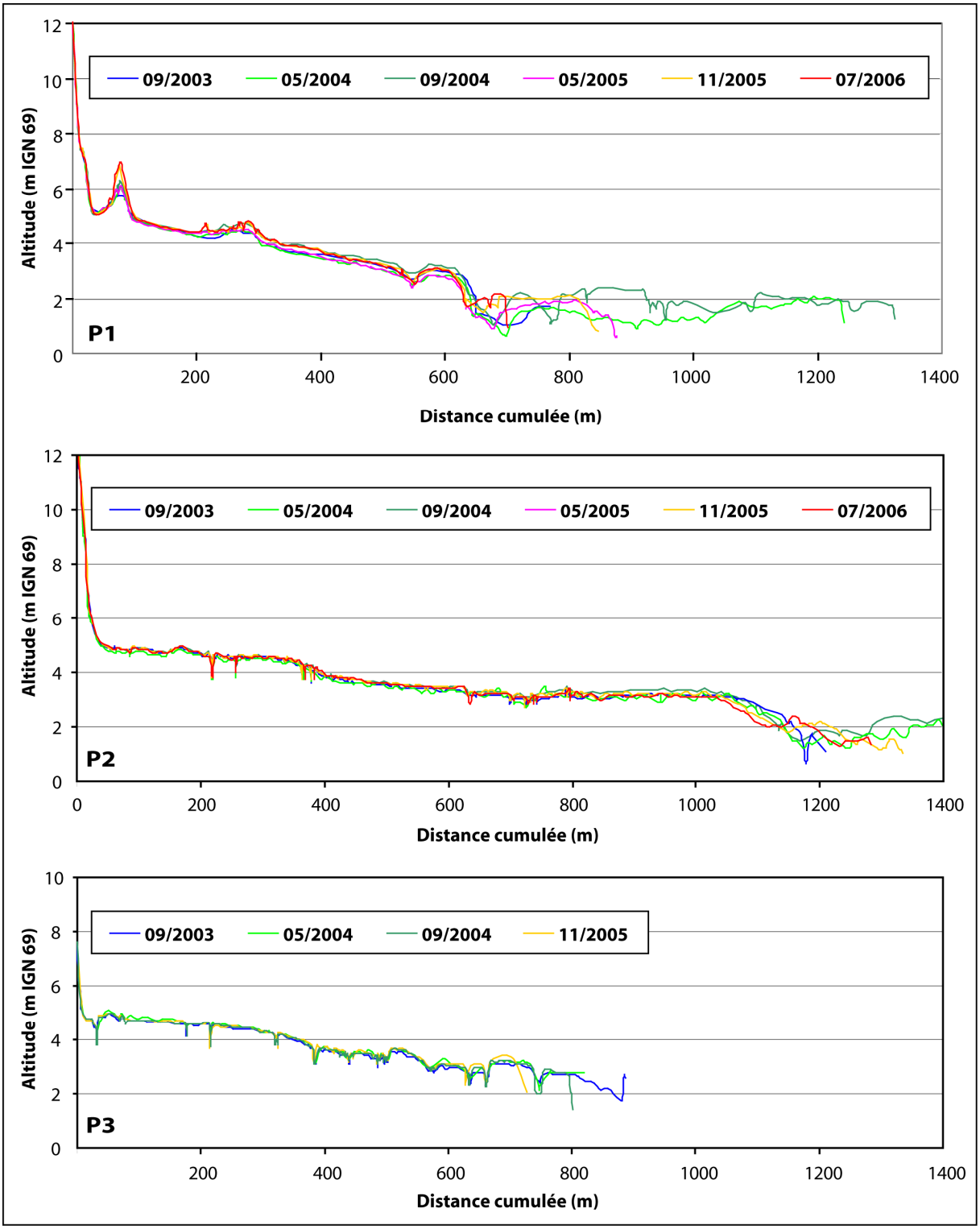


Figure 5.17. Suivi topographique des profils P1, P2 et P3.

Figure 5.17. *Elevation survey of profiles P1, P2 and P3.*

La Figure 5.18 montre l'évolution du profil P4. Il s'agit lui aussi d'un profil composé de sédiments fins à très fins et les mêmes observations que celles réalisées pour les profils P2 et P4 y sont clairement déductibles, notamment au niveau du banc presque accolé en bas d'estran. Nous avons ici choisi de zoomer sur les variations au niveau de trois chenaux de marée d'ordres différents.

Le premier chenal a une profondeur d'environ 1,20 m et une largeur de 2 m. Il possède des berges en escalier et des levées bien marquées. Le dernier relevé signale un déplacement de 2 m du chenal, mouvement qui a été peu visible à une échelle de temps plus courte. Après vérification, il s'avère que le profil croise un point d'inflexion du chenal, ce qui explique cette apparente mobilité.

Le chenal intermédiaire mesure 10 m de large et 1,80 m de profondeur. Celui-ci semble perdre légèrement en profondeur au cours du temps et s'élargir de façon importante.

Le troisième chenal en bas de profil entre la microfalaise d'érosion et le banc accolé est profond de 1,50 m et large de 20 m. Le chenal semble se rétrécir au cours du temps et la berge côté banc s'encaisser. La microfalaise montre un rythme d'érosion relativement constant estimé à 3 $m.an^{-1}$ avec une pente qui, au contraire, s'affaiblit.

Les chenaux de marée, de prime abord plutôt figés, montrent une dynamique qui s'exprime sur des pas de temps relativement courts. Les chenaux les plus larges et les moins profonds apparaissent comme les plus mobiles.

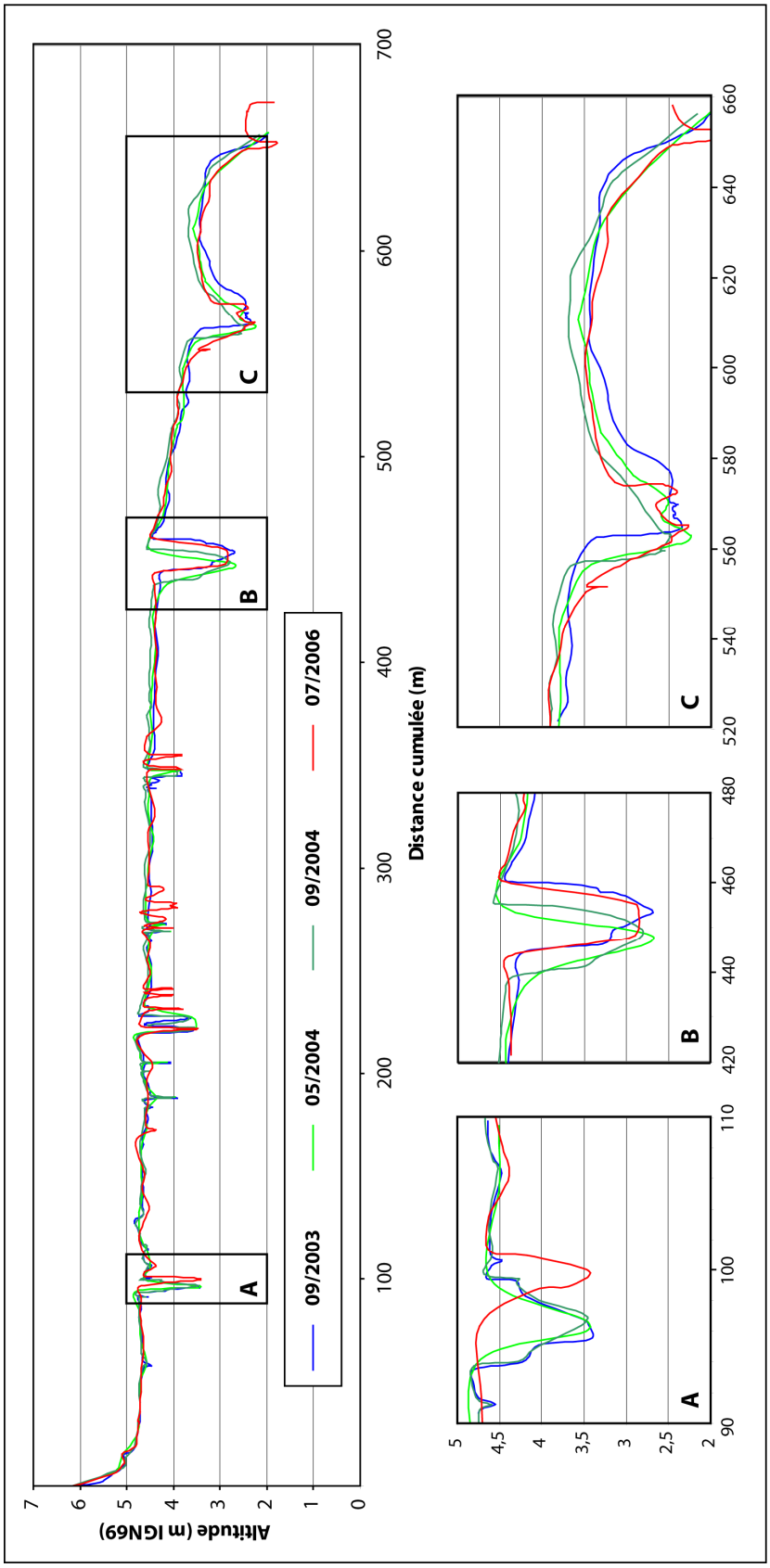


Figure 5.18. Suivi du profil P4 et zoom sur l'évolution morphologique de trois chenaux d'ordre différents.
Figure 5.18. *Elevation survey of profile P4 and close-up view of the morphological evolution of three channels of different stream orders.*

CONCLUSION

Le fonctionnement des espaces intertidaux est étroitement lié à la disponibilité et à l'apport de sédiment dans la colonne d'eau. Dans l'estuaire de l'Authie, le dépôt de sédiment s'effectue selon un rythme semi-lunaire grâce à une constante disponibilité du matériel en suspension. Les flux de sédiments à 35 cm du substrat sont quasi-équivalents quelque soit le niveau d'observation. La quantité de sédiment en transit en un point donné semble être déterminée principalement par l'hydropériode et n'est, de plus, pas clairement corrélée au dépôt observé.

Globalement sur les marais salés, le taux de sédimentation est clairement relié au marnage et au niveau altimétrique. La quantité de sédiment déposé est soumise à la cyclicité des marées, du cycle semi-lunaire au cycle équinoxial. Elle est plus importante dans les zones à spartine que dans les autres types de milieu végétalisé et le bilan net y est aussi toujours positif mais elle est influencée par son cycle végétatif. En effet, les aires colonisées par la spartine peuvent être, lors de leur sénescence, soumises à l'érosion et permettre ainsi un relargage de sédiment dans le système mais présentent également des capacités de stabilisation intéressantes en termes d'éco-aménagement.

Il reste difficile d'estimer l'évolution altimétrique de ces zones et d'interpréter cette donnée convenablement. Les marais montrent un changement d'élévation de l'ordre de 0,75 $cm.an^{-1}$ alors que l'accrétion enregistrée sur la vasière est de l'ordre de 13 $cm.an^{-1}$. Cette grande différence, malgré les situations différentes des stations, met en évidence une compaction importante du sédiment.

INTRODUCTION

L'équilibre entre l'espace d'accueil, créé par une élévation du niveau marin relatif, et l'apport en sédiment détermine le taux de remplissage et donc l'évolution à long terme des estuaires et des bassins tidaux (Dalrymple et Choi, 2007 ; Aubrey, 1986). Les changements de la géométrie du bassin sédimentaire et du prisme tidal au cours du comblement sont mis en évidence par la distribution des faciès sédimentaires à travers l'estuaire. La reconstitution des paléo-environnements sédimentaires d'un estuaire peut donc permettre de mieux comprendre les phases de remplissage et les processus impliqués sur les échelles de temps longues mais également d'esquisser son évolution future.

Les échelles spatio-temporelles sont étroitement liées dans cette approche verticale des apports sédimentaires. La succession des environnements sédimentaires dans le temps et l'espace est indicatrice des changements passés des conditions du milieu de dépôt. En replaçant les strates dans un contexte chronologique précis, une quantification réaliste des vitesses de sédimentation peut être envisagée. Les éléments de datation sont également d'une aide précieuse pour mettre en évidence d'éventuels hiatus sédimentaires ou certains processus comme la compaction liée à l'accumulation de sédiments fins et de matière organique.

Ce chapitre s'intéresse plus particulièrement à la position de la sédimentation fine vis-à-vis de l'évolution de l'estuaire et à son expression à la fois dans l'espace et dans le temps. Les reconstitutions environnementales de l'estuaire dans le temps ont été réalisées grâce à des séries de documents cartographiques et de photographies aériennes et par le biais de nombreux sondages qui ont permis d'accéder à la dimension verticale difficilement observable. L'agencement des corps sédimentaires sur une plus grande échelle spatiale a ensuite été observé lors d'études ciblées par des outils géophysiques (sismique à très haute résolution et prospection par géoradar).

1. STRATIGRAPHIE DES DEPOTS

1.1. DESCRIPTION MACROSCOPIQUE DES SONDAGES

La description des sondages a été faite en se basant sur les paramètres suivants : la lithologie, la couleur du sédiment, les structures sédimentaires, le type de contact entre les unités sédimentaires et la nature des macrofossiles.

1.1.1. LITHOLOGIE

Une couche se distingue des dépôts antérieurs et postérieurs par des discontinuités qui marquent soit un changement des conditions de dépôt, soit une surface d'érosion, soit une lacune de sédimentation. Les types de contact entre unités sédimentaires peuvent donc être érosifs ou graduels. Sur le terrain, la granulométrie est déduite au toucher et par observation visuelle. Pour définir les différentes couches sédimentaires, les termes employés sont les suivants: argile, argile silteuse, silt, silt argileux, silt sableux, sable, sable silteux, tourbe et horizon de végétation.

Les sédiments de nature silicoclastique proviennent de sources variables. Elles peuvent être classées en trois catégories (Bird, 2000) : érosion continentale (apports du fleuve), érosion marine (falaises et côtes) et remaniement de dépôts antérieurs par la houle et les courants de marée. De plus, les sédiments bioclastiques (débris d'organismes) constituent fréquemment un apport non négligeable dans le sédiment total.

Des taches de couleur de rouille sont fréquemment rencontrées au sommet des sondages (entre 25 cm et 1 m de profondeur). Ces taches sont dues aux fluctuations de la nappe phréatique continentale avec les saisons. Ce battement de la nappe forme, par hydromorphie, les taches de réduction de couleur de rouille. Ce phénomène est dû à la mobilisation du fer et du manganèse lorsque le sédiment est sous l'eau à l'état réduit (en hiver), et ensuite à la précipitation sous forme de taches de rouille par ré-oxydation lorsque le niveau piézométrique chute (en été) (Duchaufour, 1997).

1.1.2. LITAGES

Le terme de litage désigne à la fois les processus contrôlant le dépôt des sédiments en lits et l'organisation spatiale de ceux-ci. Un lit correspond à une unité de sédimentation qui s'est mise en place dans des conditions environnementales relativement stables. Suivant l'organisation verticale des lits et leurs structures internes, les litages sont classées en différents types. Plusieurs types de litages ont été rencontrés dans les sondages de l'Authie étudiés et sont décrits ci-après.

Tout d'abord les rythmites tidales dont l'origine et la structure sont présentées en Figure 6.1. Elles sont dues à des changements de la vitesse du courant lors du dépôt des sédiments. On distingue souvent des séquences successives (lamines) de sédiments aux

granulométries différentes: des sédiments fins (silt et argile) associés à une faible énergie du milieu de dépôt puis des sédiments plus grossiers (sables) reliés à une augmentation de l'énergie de ce même milieu.

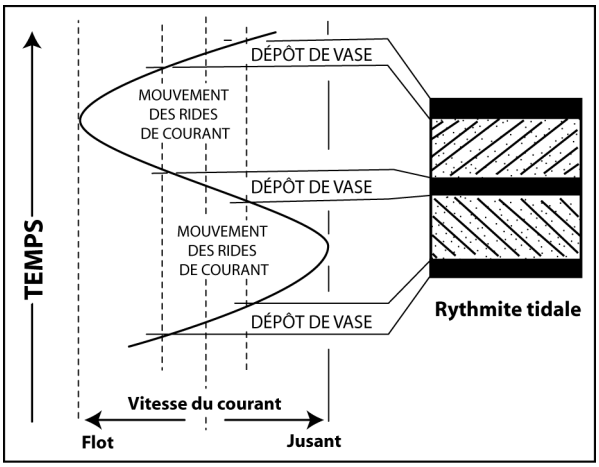


Figure 6.1. Structure des rythmites tidales en fonction des variations de vitesse du courant au cours d'un cycle tidal (d'après Dalrymple, 1992).

Figure 6.1. *Structure of tidalites as a function of current speed variations during a tidal cycle (from Dalrymple, 1992).*

Ces deux types de lamines sont planes mais dans les lamines plus grossières on peut parfois distinguer des litages obliques qui donnent une idée du sens d'écoulement des masses d'eau. Quand ces séquences sédimentaires sont préservées, le nombre et l'épaisseur des lamines peuvent représenter un enregistrement chronologique fidèle des cycles tidaux (Teissier, 1997).

On peut également observer des litages tidaux plus complexes composées de rides sableuses superposées à fines intercalations argileuses. On peut en distinguer trois types différents bien qu'il existe des litages intermédiaires de transition : en "*flaser*", ondulantes ("*wavy bedding*") et lenticulaires (Figure 6.2).

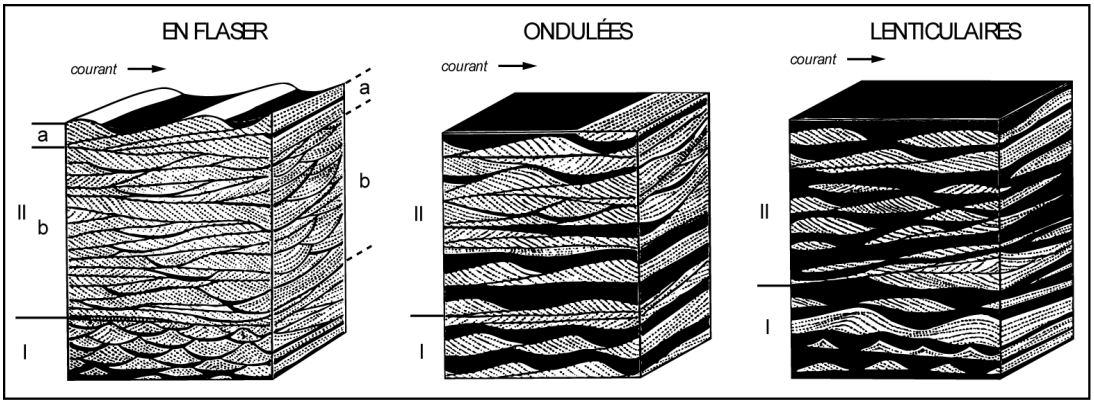


Figure 6.2. Types de stratifications tidales (d'après Reineck et Wunderlich, 1968) avec une partie inférieure **(I)** pour chaque bloc diagramme correspondant à des rides d'oscillation et une partie supérieure **(II)** correspondant à des rides de courant à crêtes rectilignes **(a)** ou courbes **(b)**.

Figure 6.2. *Tidal stratifications types (from Reineck and Wunderlich, 1968) with an inferior part* ***(I)*** *for each diagram bloc corresponding to oscillation ripples and an upper part* ***(II)*** *corresponding to currant ripples with linear* ***(a)*** *or curved crests* ***(b)***.

Ces figures sédimentaires sont associées à des environnements qui s'établissent des bas vers les hauts niveaux topographiques (Figure 6.3). Les litages en "*flaser*" sont attribués au domaine subtidal et dues à l'action d'un chenal. On y retrouve de fines lamines d'argile et des lamines larges de sables ainsi qu'une organisation en rides relativement hautes témoignant d'un hydrodynamisme important. Des structures en auge reliées au déplacement latéral du lit d'un chenal ou signes de la migration de rides à la crête arquée sont éventuellement observables. On retrouve les litages ondulés sur les estrans mixtes du domaine intertidal. Sur les plus haut niveaux, la quantité importante de sédiments fins disponibles ainsi que des conditions plus calmes du milieu favorisent des dépôts plus importants d'argiles. En coupe, ces litages apparaissent sous la forme de lentilles dans la séquence.

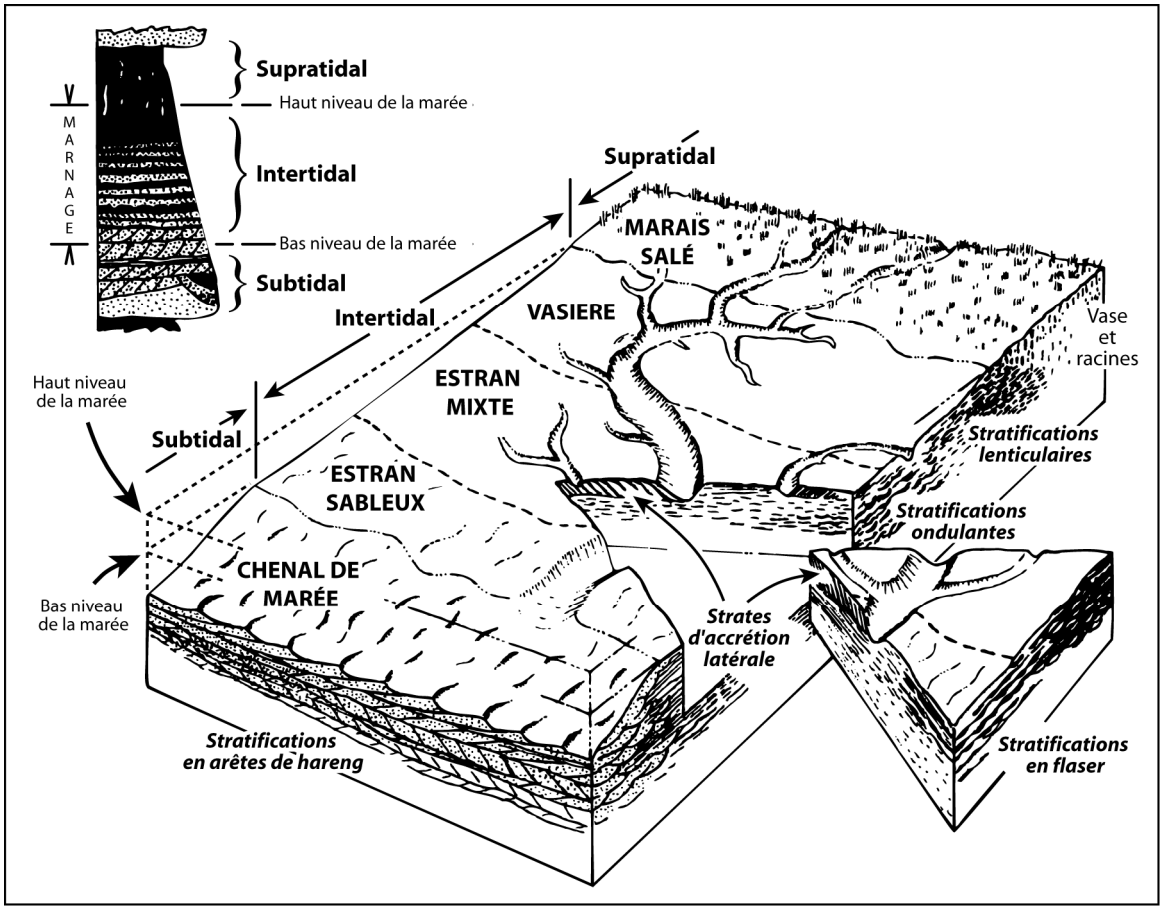


Figure 6.3. Bloc diagramme d'un estran tidal montrant ses subdivisions (subtidal, intertidal et supratidal) avec les figures sédimentaires caractéristiques (d'après Dalrymple, 1992).

Figure 6.3. *Schematic morphology, terminology (subtidal, intertidal and supratidal) and internal structure of a typical tidal flat (from Dalrymple, 1992).*

1.1.3. FAUNE ET FLORE

La faune rencontrée est relativement pauvre et se manifeste sous la forme de coquilles. Ces dernières peuvent être entières ou sous formes de débris plus ou moins altérés (valve entière ou morceaux). On distinguera également un organisme en position de vie ou non par l'intégrité de la coquille et la connexion éventuelle des valves. Lors des sondages réalisées, les espèces suivantes ont été identifiées : *Scrobicularia plana*, *Macoma baltica*, *Hydrobia ulvae* et *Cerastoderma edule*. Les trois premiers organismes sont fréquents dans les zones vaseuses tandis que le dernier est plutôt caractéristique des dépôts sableux (cf Chapitre III). Les concentrations coquillières sous forme de dépôt résiduel sont quant à elles associées aux dépôts de chenaux.

La flore observée est encore moins diversifiée. Il s'agit de roseaux à la base des niveaux de tourbe (*Phragmites*, *Carex*). On trouve aussi des morceaux de bois (*Alnus*,

Quercus et *Fagus*) lorsque l'épaisseur de la couche de tourbe est suffisamment grande. Des taches noires sont fréquentes autour de fins débris de végétaux dispersés dans les dépôts vaseux. Elles sont dues à l'oxydation des débris de végétaux (Figure 6.1). Les végétaux fixent l'oxygène présent dans le sédiment argileux qui les enveloppe. Ce dernier se trouve alors à l'état réduit et un diadème noir apparaît autour des débris végétaux, formant ainsi les taches de réduction (Nichols, 1999).

1.2. INTERPRETATION DES FACIES RENCONTRES

L'ensemble de ces critères détermine le faciès de chaque unité sédimentaire et permet l'identification de son milieu de dépôt. Pour chaque sondage, la succession de ces unités sédimentaires est présentée sous la forme d'une colonne coupée par des traits où sont indiquées les profondeurs des limites entre différents environnements (Figure 6.4Ab). Ces faciès ont été reliés aux contextes environnementaux contemporains de leur dépôt afin d'interpréter chronologiquement l'évolution de la séquence sédimentaire.

Nous présentons ici succinctement les principaux faciès rencontrés afin de faciliter la compréhension de ce chapitre. Une synthèse en images est présentée en Figure 6.4B et précède les descriptions plus détaillées.

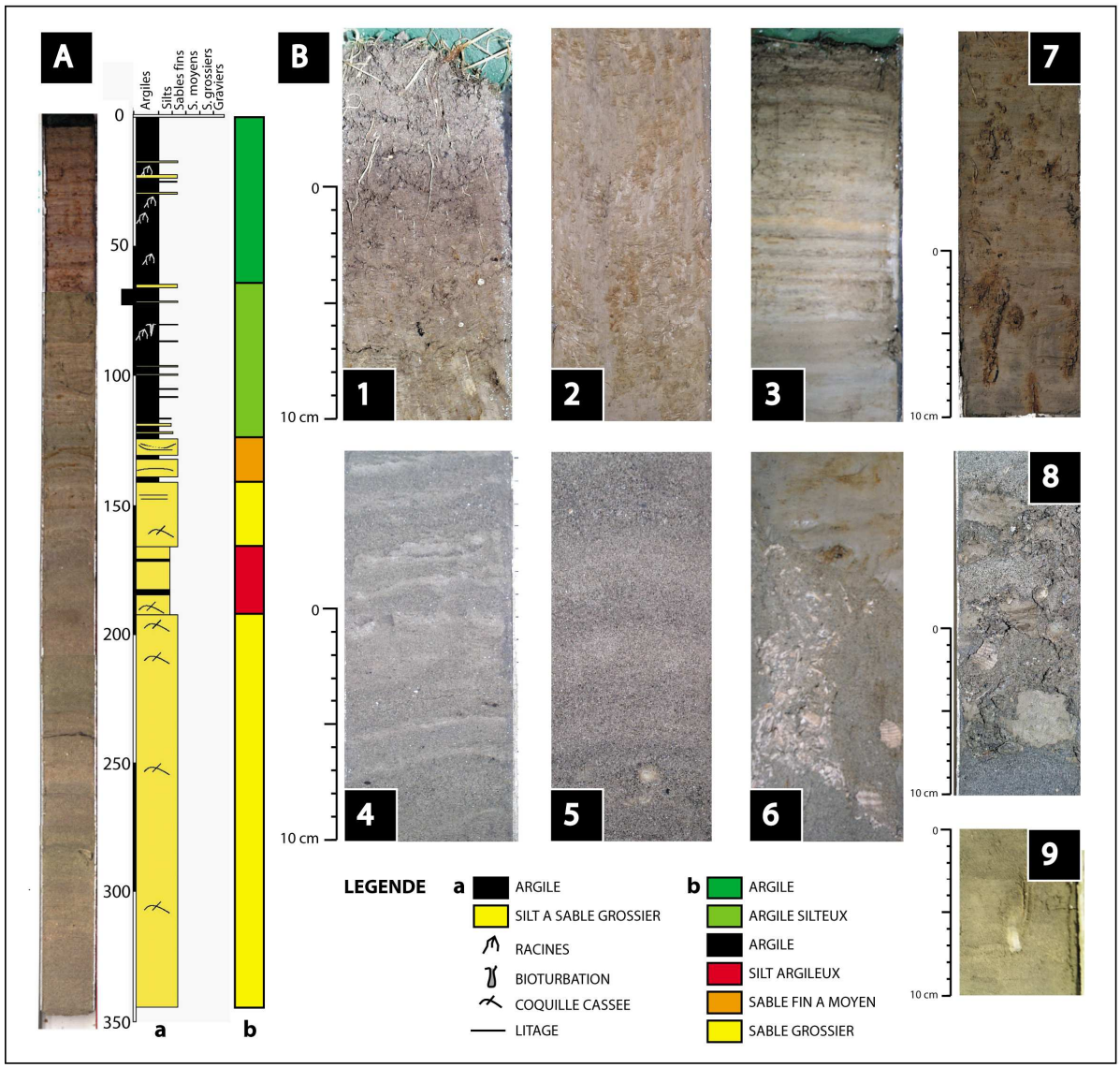


Figure 6.4. Lithologie
A. Photographie d'un sondage et colonnes lithologiques reconstituées à partir des observations du sédiment (**a.** Colonne lithologique détaillée ; **b.** Colonne lithologique simplifiée)
B. Faciès identifiés et caractéristiques : **1.** Supratidal - terre végétale ; **2.** Intertidal supérieur - schorre (vase, présence de racines, forte oxydation) ; **3.** Intertidal supérieur – haute slikke (argiles, présence de tidalites) ; **4.** Intertidal moyen – (prédominance de silts ; présence d'argiles en litages grossiers et de sables fins) ; **5.** Intertidal moyen à inférieur (sables fins à moyens, coquilles) ; **6.** Contact érosif et chaos avec débris coquilliers ; **7.** Traces de bioturbation réalisées par des Annélides ; **8.** Séquence de comblement de chenal (coquilles et blocs d'argile de différentes tailles) ; **9.** Bivalve en position de vie (*Scrobicularia plana*).

Figure 6.4. *Lithology*
A. *Typical core sequence (**a.** Detailed lithology; **b.** Simplified lithology)*
B. *Identified facies and characteristics: **1.** Supratidal - soil; **2.** Upper intertidal - schorre (mud, roots, intense oxidation); **3.** Upper intertidal - upper slikke (clays, tidalites); **4.** Intermediate intertidal – (silts dominated; fine sand and thick clay layers); **5.** Intermediate to low intertidal (fine to medium sands, shells); **6.** Erosive transition and blockfield with shell fragments; **7.** Bioturbation tracks by Annelids; **8.** Infilling channel sequence (shells and different sizes of clay pebbles); **9.** Bivalve in living position (Scrobicularia plana).*

1.2.1. FACIES SUPRATIDAL

Ce faciès se caractérise par la présence d'horizons de tourbe. La tourbe se forme à partir de l'accumulation des restes des plantes gorgés d'eau dans des conditions anaérobiques qui empêchent la décomposition. Dans les zones côtières, la tourbe se produit dans la zone supratidale, typiquement comme des marais salé (ou tourbière des mangroves sous climat plus chaud), à la transition vers l'arrière pays dans un environnement de marais d'eau douce. L'accumulation exige un environnement à énergie réduite, tel qu'en tête d'estuaire à la limite de l'action de la marée saline ou derrière des cordons et des dunes. Géographiquement, l'environnement est situé à une altitude plus haute que le niveau marin, caractérisé par le contact en équilibre entre nappe d'eau douce et d'eau salée, et de conditions locales contraignant la croissance des plantes (Shennan, 2005). Par contre, les horizons de végétation indiquent que l'environnement s'envase jusqu'à un niveau supratidal, mais pour un temps relativement court, de sorte que la tourbe ne peut pas se développer proprement (Baeteman, 2004).

Les niveaux de tourbes sont utilisés, depuis le siècle dernier, dans la reconstitution des conditions hydrologiques et climatiques passées (Blackford, 2000). Leurs caractères géomorphologiques et stratigraphiques sont fonction du niveau marin, des marées et des apports sédimentaires (Allen, 2000 b). Du point de vue eustatique, l'apparition des tourbes saumâtres ou même d'eaux douces au détriment des sables ou des argiles, au sein d'une séquence sédimentaire, est généralement attribuée à un retrait des eaux marines (Morzadec-Kerfourn, 1974 ; Ters, 1973; Allen, 2000 b) ou à une stagnation du niveau marin (Allen, 2000b).

1.2.2. FACIES INTERTIDAL SUPERIEUR

Ce faciès argileux est souvent le premier faciès rencontré lorsque l'on analyse une carotte sédimentaire depuis la surface jusqu'en profondeur. Son épaisseur varie entre 43 et 116 cm. Ces dépôts sont caractérisés par la présence de nombreuses hydrobies et une bioturbation importante. Cet ensemble argileux s'enrichit à sa base de passées, de plus en plus fréquentes, de sédiments légèrement plus grossiers (silts ou sables fins), témoins d'un dynamisme plus important du milieu de dépôt.

Caractéristique du schorre, il est composé de terre végétale à son sommet et se révèle riche en racines sur une vingtaine, voire une trentaine, de centimètres ; ces racines entraînent une oxydation forte (Figure 6.4 B2).

Caractéristique de la slikke, on peut généralement observer la présence de laminations tidales (tidalites) plus ou moins fines et nombreuses (Figure 6.4 B3) et d'une bioturbation parfois très importante (Figure 6.4 B7).

1.2.3. FACIES INTERTIDAL MOYEN

Ce faciès fait suite à celui des argiles en poursuivant l'analyse vers les parties les plus profondes de la carotte. Son épaisseur varie entre 31 et 129 cm. Ces dépôts de silts et de sables fins sont entrecoupés de nombreuses passées plus fines, essentiellement argileuses. Les bioturbations affectent toujours ce faciès riche en coquilles brisées ou entières de bivalves (principalement coques et tellines) pouvant former par leur accumulation des niveaux légèrement plus grossiers. On peut également retrouver des bivalves en position de vie (Figure 6.4 B9).

1.2.4. FACIES INTERTIDAL INFERIEUR

Ce faciès de sables fins à moyens constitue la base de toutes les carottes étudiées (Figure 6.4 B5). Il est composé de dépôts très riches en coquilles de lamellibranches accumulées parfois en de véritables horizons (thanatocénoses). Les passées argileuses sont souvent discontinues et peu nombreuses, créant des litages en flasers dans lesquels on retrouve parfois des hydrobies. Un litage peut s'exprimer au sein de ce faciès par l'alternance de lits plus fins (sables fins) ou plus grossiers (débris de coquilles ou sables grossiers).

1.2.5. FACIES DE CHENAL

On peut distinguer à cette échelle d'observation deux types de dépôts liés aux chenaux. Tout d'abord les séquences de débordement de chenal qui sont constituées de sédiments généralement plus grossiers par rapport aux environnements sédimentaires adjacents, et largement bioclastiques. Cette activité des chenaux est notamment à l'origine de la formation de levées latérales (Gérard, 1999). Le deuxième type de séquence est dite de

comblement de chenal et présente fréquemment des éléments remaniés de tourbe et des galets argileux intercalés (Figure 6.4 B8). Le remplissage définitif d'un chenal n'est pas toujours uniquement sableux. Dans le cas de chenaux de taille moins importante, il n'est pas rare d'observer un remplissage argileux (Reineck et Singh, 1980).

1.3. COUPES STRATIGRAPHIQUES

1.3.1. GENERALITES

La séquence stratigraphique typique des plaines tidales et estuariennes de l'Europe du Nord Ouest dont l'Authie fait partie est généralement relativement simple. Elle est constituée d'un empilement de niveaux de sables, de silts et de vase alternant avec des couches de tourbe et/ou d'horizons végétaux (Mrani-Alaoui, 2006). Cette séquence commence par une tourbe de base couvrant souvent un substrat rocheux désagrégé et pédologiquement altéré ou des dépôts pléistocènes (Woodroffe, 2002). La tourbe est recouverte soit par de l'argile, soit par du sable ou du silt. Ces couches de sédiments minérogènes peuvent contenir des niveaux intercalaires de tourbe. Le remplissage final de la séquence holocène est composé de sédiments argileux homogènes associés à du sable de remplissage des chenaux tidaux (Baeteman *et al.*, 2002) qui parcourent ces plaines. La tourbe est généralement attribuée à un marécage organique au cours d'une régression locale du niveau marin (Shennan, 1986 ; Shennan, 2005), tandis que les sédiments clastiques marquent une transgression marine. La succession, à l'intérieur d'une séquence sédimentaire, de certains dépôts, comme la transition entre un niveau de tourbe et un niveau argileux (Allen, 2000b), est généralement considérée comme l'indice d'une tendance transgressive des eaux (Steel et Pye, 1997), et elle est souvent matérialisée par une surface d'érosion. Inversement, la transition silts/tourbe dans une séquence marque une tendance régressive des eaux (Vos et De Wolf, 1997; Waller *et al.*, 1999). Les lacunes de sédiments, principalement matérialisées par des surfaces d'érosion, peuvent correspondre à un abaissement du plan d'eau ou une absence de sédimentation liée au retrait de l'eau (Allen, 2000b).

Ce type de séquence stratigraphique (Figure 6.5) est commun le long des côtes tempérées de l'Europe du nord ouest là où, dans un contexte de montée rapide du niveau marin holocène, des conditions de morphologie littorale pré-existante ont été propices au

piégeage de sédiments minérogènes au-dessus du substrat pléistocène. Il s'agit notamment de larges échancrures semi-protégées où peut s'exercer l'influence de la marée non seulement par le biais de l'inondation tidale, mais aussi par l'activité des chenaux de marée (Shennan, 1986, Long et Innes, 1995 ; Baeteman 1999 ; Allen, 2000b ; Brew *et al.*, 2000 ; Long *et al.*, 2000 ; Baeteman *et al.*, 2002 ; Beets *et al.*, 1992 ; Woodroffe, 2002). Les apports d'eau douce du continent dans ce type d'environnement bordier ont été de plus favorables au développement de marécages, où la tourbe s'accumule.

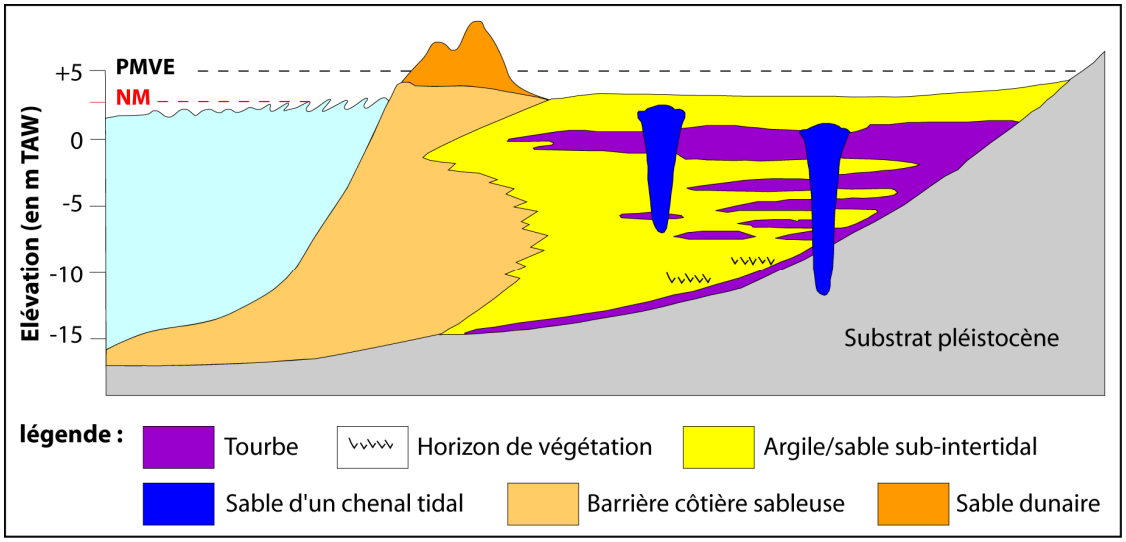


Figure 6.5. Coupe stratigraphique schématique de la séquence holocène le long des côtes de l'Europe du nord ouest (d'après Baeteman *et al.*, 2002).

Figure 6.5. *Schematic representation of the Holocene sequence along North-West European coasts (from Baeteman et al., 2002).*

Bien que l'esquisse stratigraphique présentée ci-dessus paraît simple, en réalité la stratigraphie séquentielle (dans le sens spatio-temporel d'agencement des couches selon les définitions de Posamentier, …) de ces plaines est nettement plus complexe avec une forte variabilité inter-site de la répartition des dépôts et des niveaux de tourbe (Mrani-Alaoui, 2006). Même si le niveau marin constitue un contrôle de base sur le développement de ces plaines, et conditionne, avec la morphologie pré-existante, l'espace d'accueil des sédiments, la sédimentation elle-même variera en fonction de la nature des sédiments disponibles, de la morphologie du substrat pré-existant, du drainage terrestre, et de contrôles morphodynamiques internes qui accompagnent l'évolution des littoraux, dont l'importante capacité d'auto-compaction de la tourbe, génératrice elle-même d'espace d'accueil.

Dans leur classification dynamique des estuaires (Chapitre I), Dalrymple *et al.* (1992) ont considérés plus en détail l'interaction entre les influences respectives du fleuve, de la houle et de la marée en relation avec les faciès sédimentaires (Figure 6.6). Ils ont défini deux types d'estuaires : dominés par la houle et dominés par la marée. Les caractéristiques morphologiques de l'Authie au regard de ces deux modèles ayant déjà fait l'objet d'une discussion au Chapitre III, l'organisation stratigraphique de son prisme de comblement fera l'objet ici d'une attention particulière.

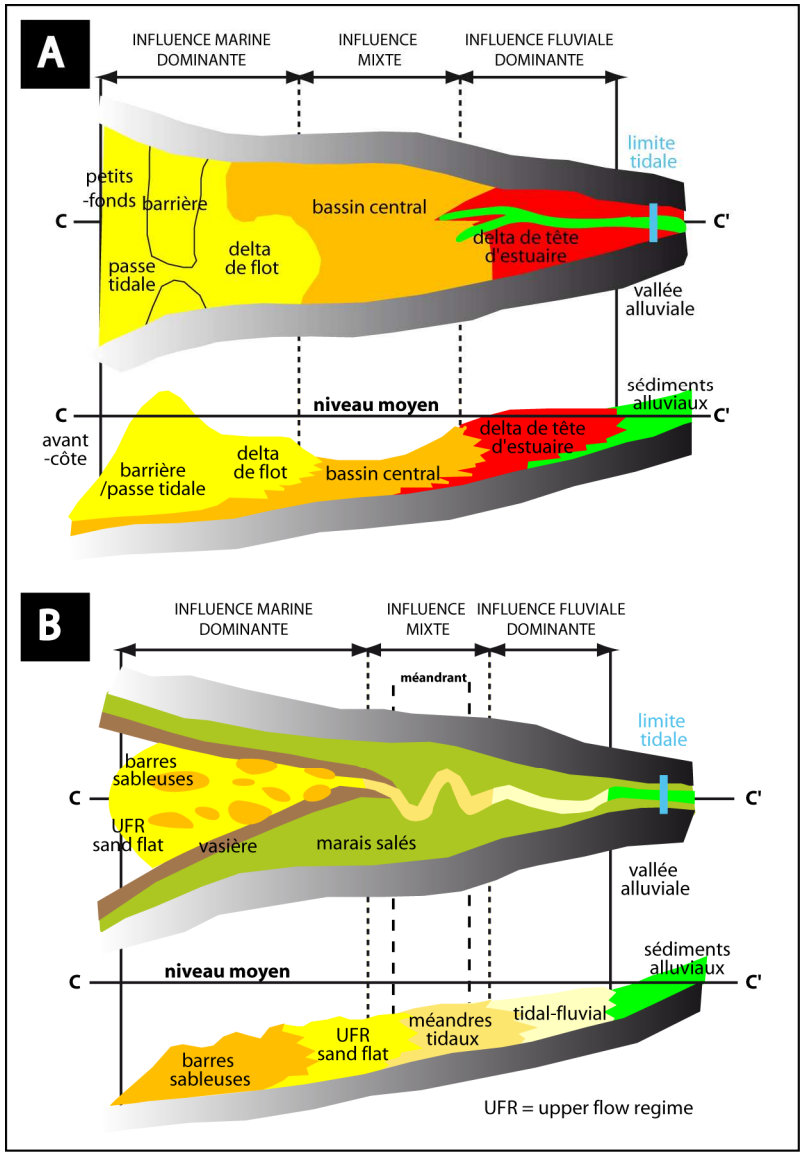


Figure 6.6. Distribution des unités morphologiques et esquisse de l'organisation stratigraphique du prisme de comblement (d'après Dalrymple *et al.*, 1992).
A. Estuaire dominé par la houle ; **B.** Estuaire dominé par la marée.

Figure 6.6. *Distribution of morphological units and schematic stratigraphy organization of infilling prism (adapted from Dalrymple et al., 1992).*
A. *Wave dominated estuary;* ***B.*** *Tide dominated estuary.*

Les sondages relativement bien alignés permettent, lorsque leur densité est suffisamment grande, de réaliser des coupes stratigraphiques montrant des variations latérales de faciès. Pour cela, les colonnes lithologiques sont ajustées grâce à leur altitude et leur position géographique selon la coupe choisie (Annexe VI-1 à 3). Les différentes unités représentées dans ces colonnes lithologiques sont corrélées sur la base de l'interprétation des environnements sédimentaires. Vu la grande variabilité latérale des faciès, aucun sondage n'a été projeté ; seuls les sondages présents sur la coupe ont été utilisés. Quatre coupes stratigraphiques ont été réalisées à partir des sondages sélectionnés : une longitudinale, selon un axe Ouest-Est et trois transversales selon un axe Nord-Sud (aval, interne et amont) (Figure 6.7). Il faut cependant noter que chaque coupe est basée sur les sondages disponibles, mais que du fait des grandes variations latérales de faciès, des sondages supplémentaires peuvent modifier l'allure de ces coupes.

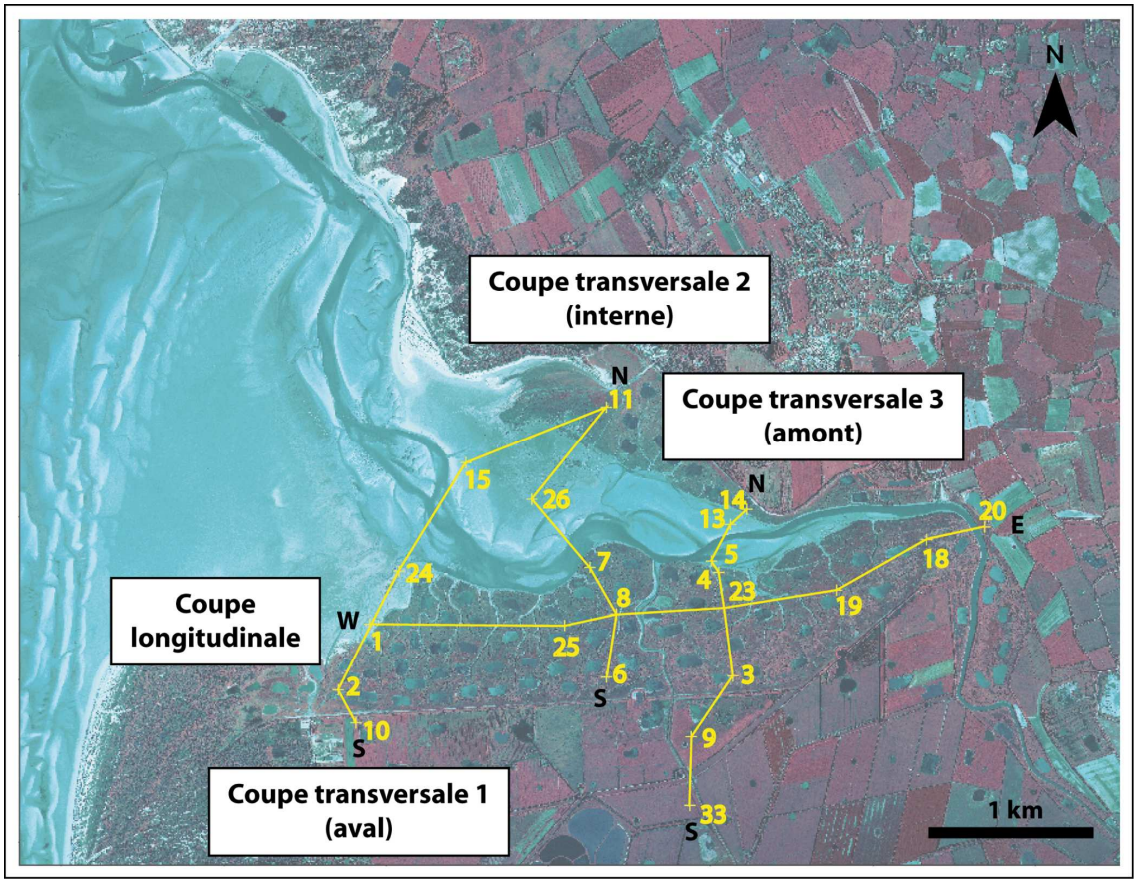


Figure 6.7. Localisation des sondages et du tracé des coupes réalisées.

Figure 6.7. *Location of cores for stratigraphic profiles construction.*

1.3.2. COUPE LONGITUDINALE

Cette coupe longitudinale de l'estuaire moyen s'étend de la base de la flèche sableuse principale en rive Sud au premier coude de l'Authie sur la rive Nord, peu après la Madelon (Figure 6.7). Elle s'oriente d'Ouest en Est et traverse plusieurs chenaux actuels dont le canal des Mollières en son centre (entre les sondages 8 et 23) et le chenal principal de l'Authie dans sa partie orientale (entre les sondages 18 et 20) (Figure 6.8). Le profil topographique est concave à l'exception du sondage 20 qui dénote par une cote altimétrique plus basse.

La coupe est marquée à sa base entre 2 et 1 m IGN69 environ par des sables grossiers à très grossiers, très coquilliers marquant la présence passée de chenaux relativement larges (sondages 1 et 23), de dimension à être l'ancien lit du chenal principal. Le sondage 25 présente une séquence de débordement importante (18 cm) qui pourrait être reliée à l'action du chenal principal. Le sondage 20 présente des caractéristiques bien différentes des autres sondages entre les mêmes niveaux : une séquence de silt argileux progressant vers de l'argile avec présence de racines entre 323 et 343 cm. Cette évolution montre un passage progressif de l'intertidal supérieur vers du « supratidal » interrompue une première fois par des dépôts de chenaux (sables grossiers coquilliers et tourbe remaniée) entre 303 et 323 cm. La séquence reprend ensuite son évolution sur un faciès intertidal supérieur jusqu'à une couche de tourbe en place (entre 207 et 212 cm) recouverte de nouveau par une séquence de dépôt de chenal que l'on pourrait attribuer au chenal principal (20 cm d'épaisseur). Cette séquence est recouverte par du sable moyen à fin caractéristique d'un milieu intertidal inférieur à moyen. On retrouve cette dernière transition sur tous les autres sondages bien que les carottes 1 et 23 montrent quelques perturbations : retour à des milieux à énergie faible (lamine épaisse d'argile ou de silts), et plus forte (lamines épaisses de sables plus grossiers) alternativement dans une matrice de sable fin à moyen dans le sondage 1 et lamines de sables coquilliers plus grossiers dans une matrice de sable grossiers dans le sondage 23. Ces transitions seraient dues à une influence plus ou moins grande du chenal principal sur le milieu. Elles pourraient être expliquées par une divagation latérale importante de son lit.

On observe ensuite une évolution classique plus ou moins progressive vers un milieu « supratidal » pour la partie située à l'Est du canal des Mollières (sondages 23, 19, 18 et 20) avec différentes épaisseurs des strates liées aux différents milieux sédimentaires qui se succèdent. Globalement, les faciès de sables fins ou de silts lités s'amenuisent alors que les faciès argileux lités (slikke) ou avec racines (schorre) augmentent d'aval en amont. On peut toutefois remarquer que la proportion relative de ces deux derniers horizons s'inverse

également selon la même direction, avec un faciès de slikke plus important en aval qu'en amont. La partie occidentale de la coupe (sondages 1, 25 et 8) présente des séquences bien différentes. Sur le sondage 8, on peut observer des dépôts de sédiments grossiers entre 114 et 160 cm qui témoignent de la présence d'un petit chenal secondaire avant de revenir à un faciès de sables à granulométrie plus fine que l'on retrouve dans les deux autres sondages. Cependant, la carotte 1 est marquée par une séquence haute perturbée et composée majoritairement de sables fins entrecoupés de strates parfois pluri-centimétriques d'argiles (jusqu'à 14,6 cm) ou de silts (jusqu'à 8,1 cm). Après un bref passage à de l'argile avec des lamines de silts, elle est finalement surmontée par des sables moyens. Sur les deux autres sondages, on passe en revanche assez brusquement d'un milieu sableux ouvert (sable moyens) à des séquences argileuses importantes, avec les même tendances sur les proportions des faciès de slikke et de schorre que nous avions précédemment observées dans la partie orientale.

1.3.3. COUPE TRANSVERSALE 1 (AVAL)

Cette première coupe transversale (Figure 6.9, gauche) est orientée suivant un axe Sud Sud-Ouest - Nord-Est (Figure 6.7) et franchit l'Authie dans sa partie centrale entre les sondages 24 et 15. Le premier sondage (carotte 10) se situe en arrière d'une digue en rive Sud, suffisamment loin de celle-ci pour ne pas présenter de faciès dû à un remblai (cf Chapitre VI, Etude de paléochenaux), et le dernier (carotte 11) sur le schorre de la rive Nord. La topographie du profil est plutôt hétérogène avec un premier sondage plus bas que les deux suivants. Puis l'altitude chute très brutalement de plus de 2,5 m pour le sondage 24 avant d'augmenter de nouveau plus progressivement sur l'autre rive vers un niveau comparable à la rive Sud.

Cette coupe stratigraphique est caractérisée par la présence de larges chenaux (Figure 6.9). On retrouve la position ancienne d'un chenal secondaire décrite précédemment dans la coupe longitudinale (sondage 1). On remarque que celui-ci ne se connecte pas à d'autres faciès de chenaux. En revanche, le sondage 16 présente une séquence qui pourrait être directement reliée à l'action du chenal principal, occasionnant des dépôts de débordement de chenal plus ou moins régulièrement dans une matrice de sables fins à moyens. Une série comparable peut être observée entre 175,5 et 214,9 cm sur le sondage 2, et peut être reliée à l'action du chenal secondaire repéré sur le sondage adjacent.

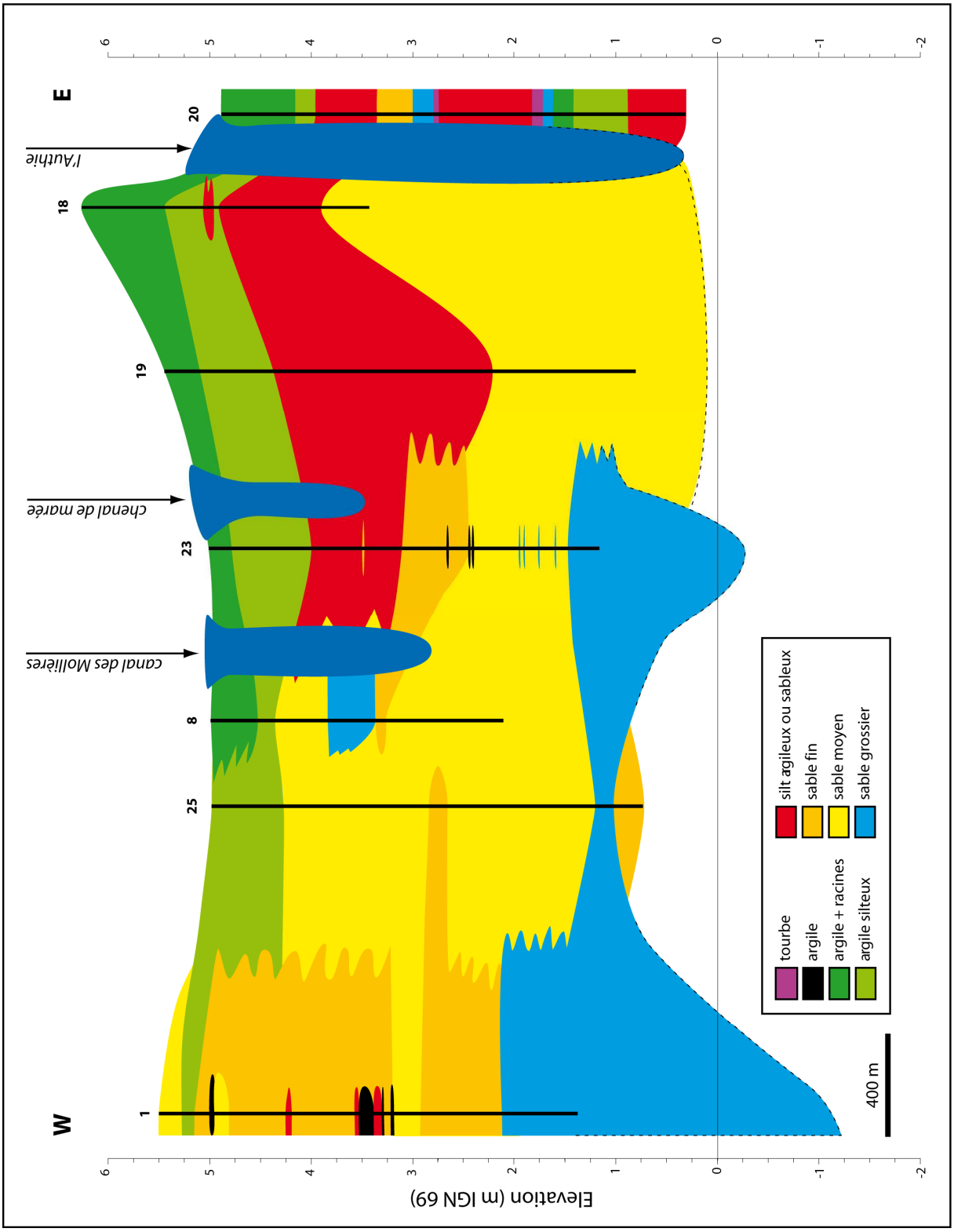


Figure 6.8. Coupe longitudinale.

Figure 6.8. *W-E section.*

Bien qu'une grano-décroissance du bas vers le haut du profil soit nettement identifiable, la coupe est fortement perturbée dans sa partie méridionale, suggérant une mobilité importante du réseau de chenaux au cours du temps, et notamment une divagation extrême du chenal principal. La coupe est surmontée de dépôts de sables dunaires dont la répartition met en évidence l'accrétion du poulier.

1.3.4. COUPE TRANSVERSALE 2 (INTERNE)

Cette deuxième coupe transversale (Figure 6.9, droite) s'établit selon un axe Sud-Nord (Figure 6.7) et franchit elle aussi l'Authie dans sa partie centrale entre les sondages 7 et 26. Elle prend appui de part et d'autre sur le schorre mature de la rive Sud et Nord, entre 4,75 et 5,25 mIGN69. Le niveau topographique s'encaisse ostensiblement au niveau du chenal où il atteint 3,50 mIGN69.

De nouveau, des chenaux importants caractérisent les bas niveaux de la coupe (sondage 7 et 26) mais cette fois-ci plus en son centre de -0,5 à 3 mIGN69 (Figure 6.9, droite). On observe également un chenal secondaire un peu plus haut dans la coupe (sondage 8) entre 3,25 et 3,75 mIGN69 ainsi que des dépôts fins de sables grossiers, en position intermédiaire entre ces deux séquences, qui peuvent être reliés à des épisodes de débordement de chenal (sondages 6 et 11).

Des deux côtés du chenal on observe une transition progressive des environnements successifs vers un milieu supratidal avec une grano-décroissance des sédiments vers la partie supérieure de la coupe et une bonne concordance des différentes séquences. On remarque que la rive Sud est cependant dominée par les sédiments fins comparativement à la rive Nord. Ceci semble être imputable à l'action prédominante du chenal principal sur la partie méridionale de l'estuaire à ce niveau.

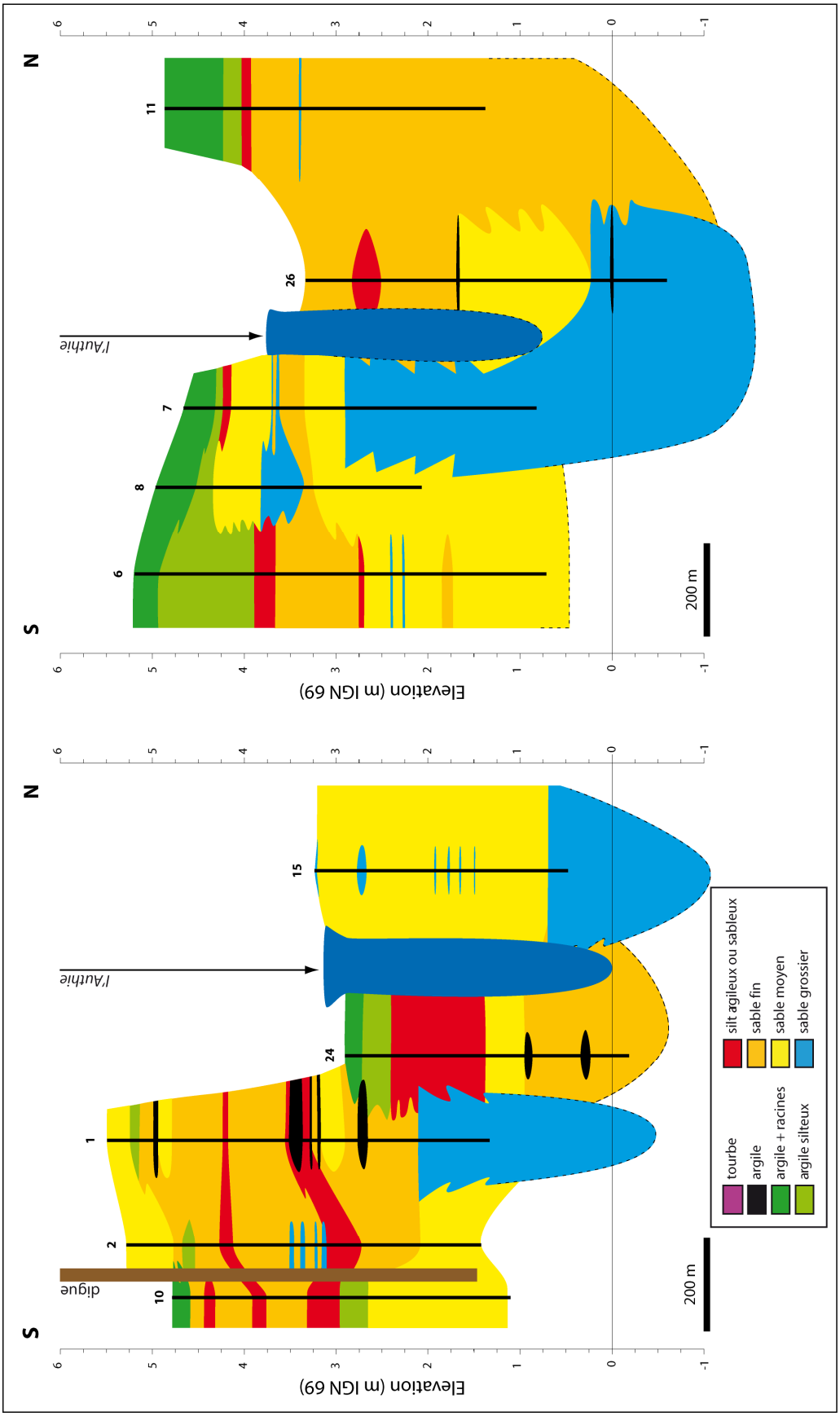


Figure 6.9. Coupes transversales 1 (aval) et 2 (interne).

Figure 6.9. *Western (downstream, 1) and central (2) cross sections (numbers refer to Figure 6.7).*

1.3.5. COUPE TRANSVERSALE 3 AMONT (CT3)

La dernière coupe transversale est orientée de manière similaire à la précédente (Figure 6.7), mais regroupe de plus deux sondages en arrière de deux endiguements successifs (Figure 6.10) avec la même attention portée aux remblais possibles. Du point de vue topographique, les sondages se situent dans une gamme relativement étroite hormis le premier sondage et ceux situés de part et d'autre du chenal actuel de l'Authie. La rive Nord est cependant plus basse que la rive Sud.

La partie inférieure de la coupe est uniquement constituée de sables moyens à fins d'une épaisseur quasi-comparable sur tous les sondages. Cette séquence est perturbée par des épisodes de basse ou plus forte énergie qui se traduisent par le dépôt de sédiments plus ou moins grossiers et notamment de dépôts attribués aux chenaux. On note tout d'abord la présence d'un chenal très important sur le sondage 5 entre 2 et 0,75 mIGN69. Il pourrait se prolonger sur les sondages adjacents vers le Sud (carottes 4 et 23). On peut de toute façon déduire qu'il s'agit de l'ancien lit du chenal de l'Authie qui aurait depuis migré vers le Nord. Cette hypothèse est confirmée par les silts qui surmontent cette séquence de comblement, suggérant un changement brusque des conditions d'agitation du milieu. Les sondages 9, 23, 4 et 13 montrent des séries de séquences de débordement de chenal dans cette matrice de sables entre 3 et 1 mIGN69. Celles-ci sont nettement plus importantes sur la dernière carotte en relation avec la proximité du chenal principal. Les autres pourraient être plutôt dépendantes de chenaux secondaires. En revanche, un petit chenal comblé apparaît sur le sondage 33 entre 148,2 et 169,6 cm.

Cette séquence est surmontée de silts sur des épaisseurs variables d'un sondage à l'autre. On remarque cependant que ces dépôts sont plus importants du Sud vers le Nord. La partie haute de la coupe est constituée d'argiles litées de silts puis d'argiles d'une séquence de schorre sans tendance spatiale réellement observable si ce n'est les altitudes relatives plus basses de ses dépôts sur les sondages 33 et 5 par rapport à l'ensemble des carottes. Le sondage 14 présente une stratigraphie classique d'un milieu soumis à l'exhaussement sous un apport sédimentaire continu avec une transition de sables moyens vers de l'argile par paliers.

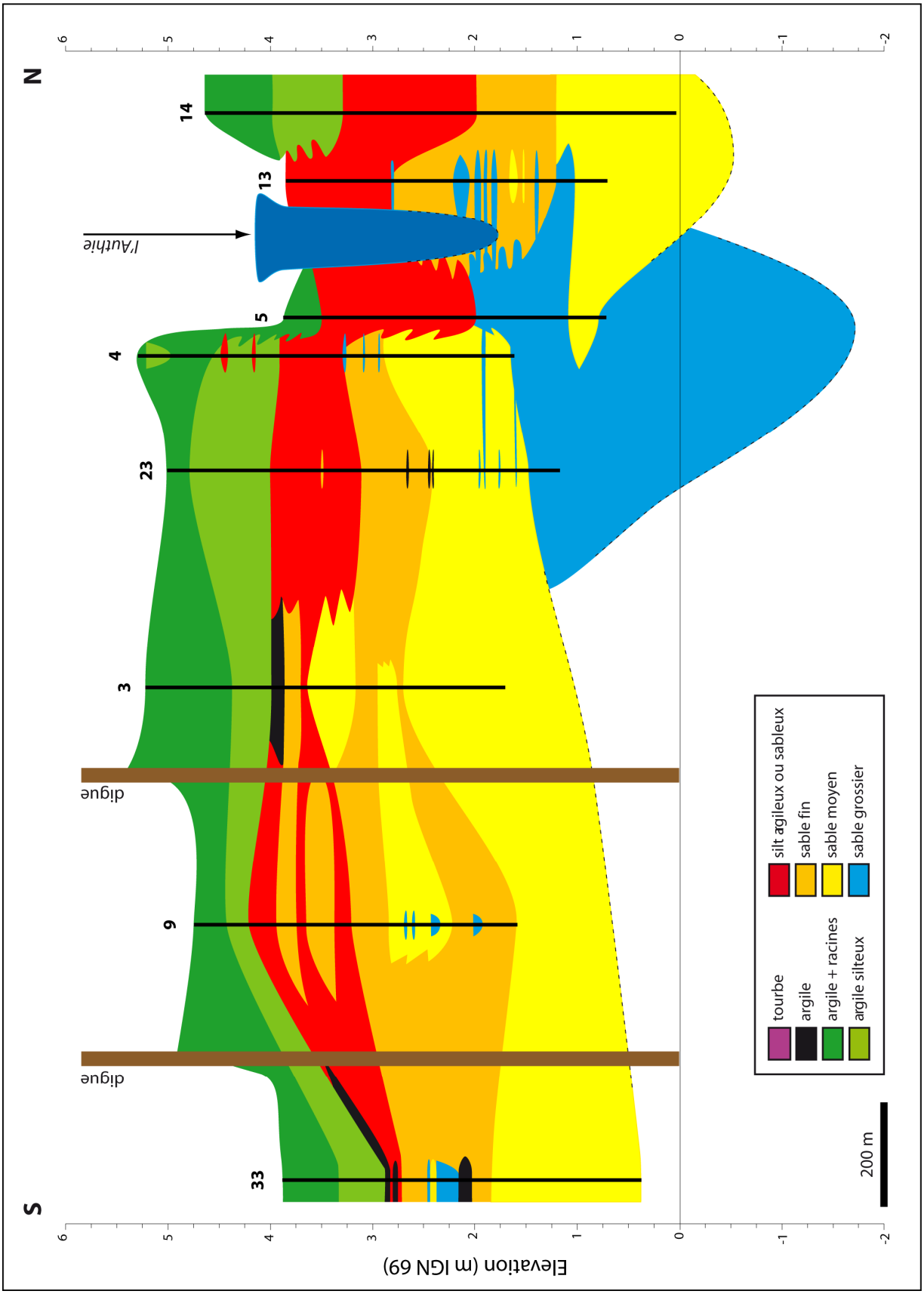


Figure 6.10. Coupe transversale 3 (amont).

Figure 6.10. *Eastern (upstream, 3) cross section.*

1.4. CAS SPECIFIQUE DES CHENAUX

1.4.1. STRUCTURES SEDIMENTAIRES LIEES AUX CHENAUX

Comme nous l'avons décrit précédemment, lorsque l'énergie du courant tidal est suffisamment élevée, la base d'un chenal est érosive et fréquemment comblée par les dépôts résiduels constitués de galets boueux ou tourbeux et/ou de débris bioclastiques. De la même manière que pour les chenaux fluviatiles, ceux-ci restent rarement fixes et migrent latéralement, se comblent et se redéveloppent ailleurs. Cette dynamique est responsable de la migration des dépôts de méandres par accrétion latérale (Figure 6.11A).

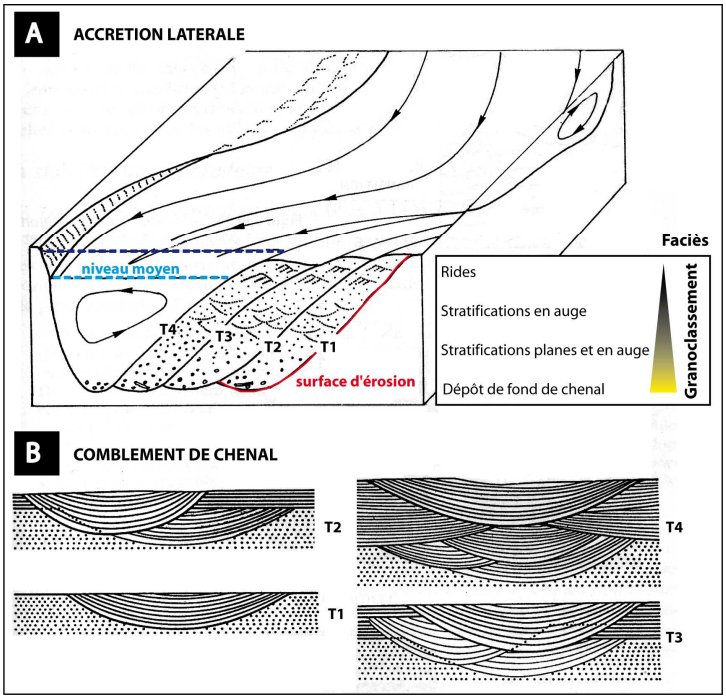


Figure 6.11. Stratifications entrecroisées (d'après Cojan et Renard, 1999)
A. Représentation schématique d'un cas d'accrétion latérale dans un chenal (rive convexe) ;
B. Stratifications en auge : comblement de chenal.

Figure 6.11. *Cross beddings (from Cojan and Renard, 1999)*
A. *Cross profile of a point bar in a channel (convex side);* ***B.*** *Trough crossbeddings: channel infilling.*

Les chenaux présentent, suivant leur ordre, des stratifications entrecroisées de différents types. Tout d'abord des stratifications ondulantes (chenal de petit ordre) ou en flaser (chenal d'ordre intermédiaire) qui ont été décrites dans la partie précédente. On peut également y observer des stratifications entrecroisées de plus grande échelle, les stratifications en auge (Figure 6.11A et B). Elles sont composées de strates entières et ne sont pas

observables *via* les sondages classiques en raison de leur taille et géométrie. Les outils géophysiques sont donc d'une grande aide pour mettre ces structures en évidence. L'agencement de ces stratifications permet notamment de visualiser les étapes du comblement d'un chenal (Figure 6.11B).

1.4.2. ETUDE DES PALEOCHENAUX

Une étude sur des paléochenaux estuariens a été menée en rive Sud en avril 2003 à l'aide de sondages et d'une prospection par géoradar afin de comprendre les processus de comblement des chenaux. Nous avons testé le géoradar dans une zone poldérisée depuis plusieurs siècles et après une période suffisamment sèche afin de nous affranchir de certaines de ces limitations de cet outil. Les profils géoradar ont été réalisés perpendiculairement à l'axe des chenaux grâce à leur empreinte topographique après repérage sur une photographie aérienne (Figure 6.12).

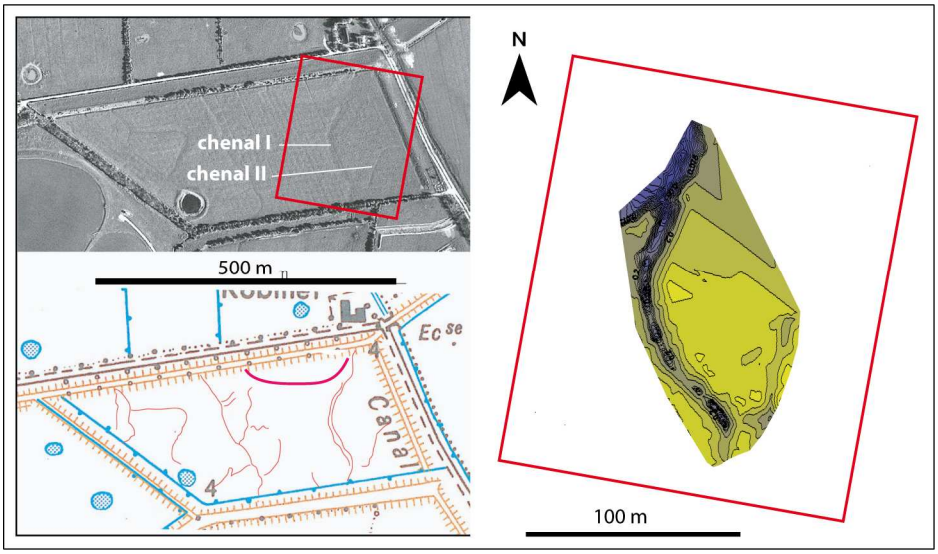


Figure 6.12. Localisation des paléochenaux étudiés et topographie.

Figure 6.12. *Location of studied palaeochannels and topography.*

Les deux coupes réalisées montrent toutes deux de façon générale une grano-décroissance des sédiments du bas vers le sommet de l'enregistrement sédimentaire (Figure 6.13). Il s'agit d'une séquence classique qui se met progressivement en place lors du comblement estuarien et que l'on a pu déjà observer sur les coupes stratigraphiques générales de l'estuaire. Les deux niveaux chaotiques observés dans les sondages 28 et 31 sont formés

par une accumulation de blocs allochtones de nature argileuse qui correspond bien à un faciès de comblement de chenal. Leur agencement dans la séquence sédimentaire diffère toutefois sensiblement et semble démontrer une mise en place distincte.

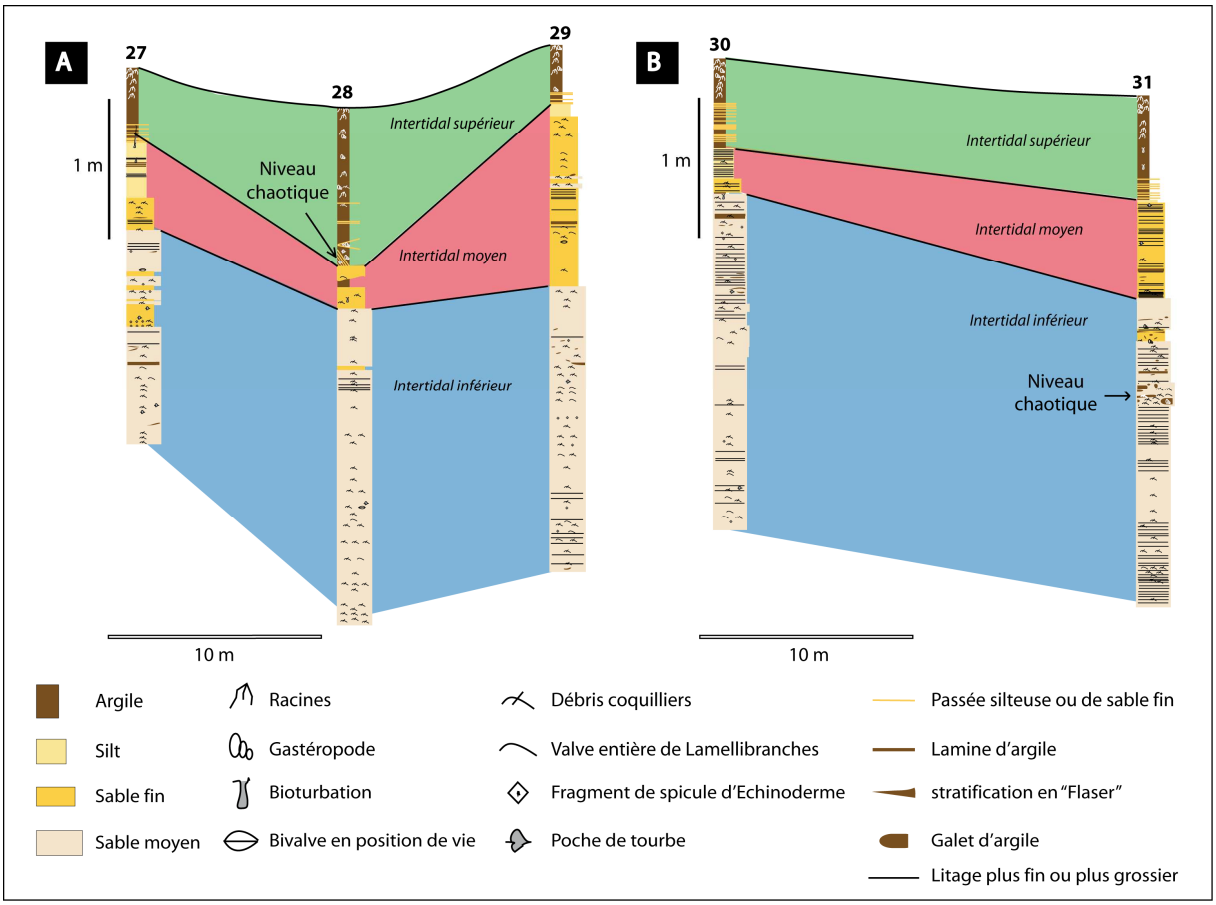


Figure 6.13. Coupes transversales sur un réseau de paléochenaux
A. Comblement d'un chenal secondaire ;
B. Comblement d'un chenal d'ordre plus important et remblai.

Figure 6.13. *Cross-shore sequence of a palaeochannels network*
A. *Infilling of a secondary channel;*
B. *Infilling of an upper stream channel and reclamation fill.*

Dans le sondage 31, les blocs sont de même nature que l'encaissant et possèdent leurs propres laminations. Le pendage conséquent de ces lamines prouve que ces blocs ont basculé depuis les bordures du chenal. Ce comblement pourrait donc être artificiel, créé ou favorisé par des actions anthropiques qui consistent à combler, après poldérisation, une dépression correspondant à un ancien lit avec des blocs d'argiles prélevés sur ses bordures (remblaiement).

Les blocs argileux à hydrobies ont, quant à eux, des contours bien marqués dans le sondage 28. Ils sont inclus dans une matrice de sédiments grossiers riches en débris coquilliers. Ces blocs proviennent donc des berges d'un chenal, déstabilisées par l'action d'un fort hydrodynamisme associé éventuellement à une fracturation des levées. Ce dernier processus semble êtres favorisé par la bioturbation, exercée notamment par le crabe vert et l'amphipode *Corophium volutator* (French, comm. pers.), et par des fentes de dessiccation (Allen, 2000).

Les profils réalisés avec le géoradar (Annexe VI-4) mettent en évidence trois faciès différents. Tout d'abord, un faciès sombre où des réflecteurs correspondant à la présence d'eau (niveau d'une nappe phréatique) peuvent être présents. On peut observer ensuite deux faciès clairs. Le premier présente des réflecteurs horizontaux qui peuvent délimiter des séquences sédimentaires mais également correspondre à des artéfacts, en particulier à proximité de la surface, en raison de l'atténuation du signal dans les premiers décimètres entraînant une zone aveugle pour l'interprétation. Le deuxième montre des réflexions obliques. La vitesse des ondes électromagnétiques a été évaluée à 0,092 $m.ns^{-1}$ en utilisant les données des sondages réalisés le long des profils. Cette valeur est conforme à celles relevées dans la littérature pour des sédiments du même type (alternances silto-argileuses de sédiments récents). La vitesse associée corrélée à la topographie nous a permis de restituer la géométrie exacte des réflecteurs (partie droite des figures).

Le profil géoradar de la première coupe (Figure 6.14) montre des réflecteurs obliques avec des pendages atteignant 11°, suggérant une accrétion latérale du chenal. Cependant, sur certains profils, de nombreux réflecteurs obliques sont situés sur le côté externe de la courbure du méandre (profil 145), alors que sur d'autres (profils 230 et 45) (Annexe VI-5), ils sont présents de part et d'autre de l'axe du chenal. Il ne s'agit donc pas de dépôts de barres de méandres au sens classique tu terme. Ces surfaces obliques peuvent, en revanche, correspondre à la trace de surfaces de glissement en bordure des berges. En effet, des blocs re-sédimentés, aux contours nets dans les carottes, se retrouvent au milieu d'une séquence grano-décroissante typique des remplissages estuariens. Ces blocs ne se retrouvent que dans la partie centrale des profils et témoignent de la chute de blocs arrachés aux berges des chenaux, probablement par glissement le long de failles courbes.

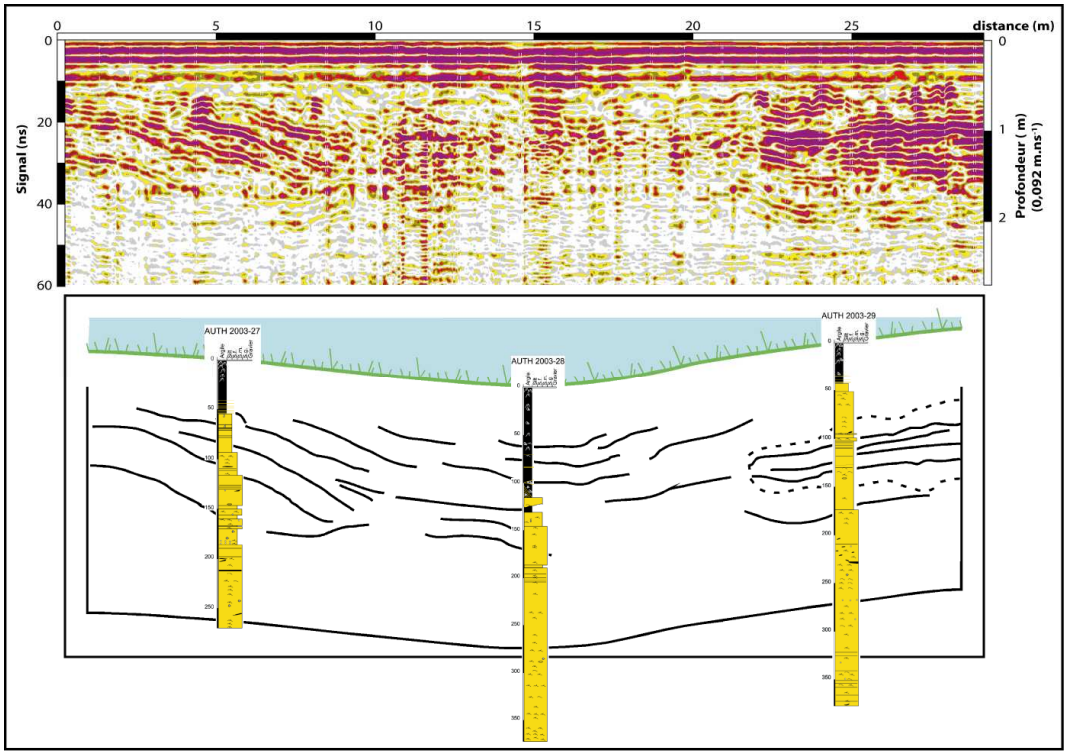


Figure 6.14. Profil géoradar d'une section de paléochenal.

Figure 6.14. *Ground-penetrating radar profile across a palaeochannel.*

Le remplissage principal de ces chenaux se fait donc en deux temps. Une première phase par glissement et basculement des blocs arrachés aux berges puis, par aggradation lors de l'abandon du chenal lorsqu'il est déconnecté du réseau estuarien principal. La poldérisation de la zone semble avoir accéléré le phénomène et, privant d'apports sédimentaires le chenal, a permis la préservation de la forme des chenaux dans la topographie actuelle. En plus du comblement naturel que l'on observe sur l'ensemble de l'estuaire, par enrichissement progressif en particules fines des séquences, la déstabilisation des bordures des chenaux peut activement participer au remplissage sédimentaire de ceux-ci.

1.4.3. ETUDE DU CHENAL PRINCIPAL

Comme nous avons pu le voir précédemment, les outils géophysiques permettent de détecter les formes de grande échelle en limitant la multiplication des sondages. Ils se révèlent également indispensables pour l'investigation de zones peu accessibles, ici le chenal principal de l'Authie. La Figure 6.15 présente la section sismique la plus large et la plus

perpendiculaire au chenal principal comme nous avons pu acquérir lors de notre campagne de mai 2003.

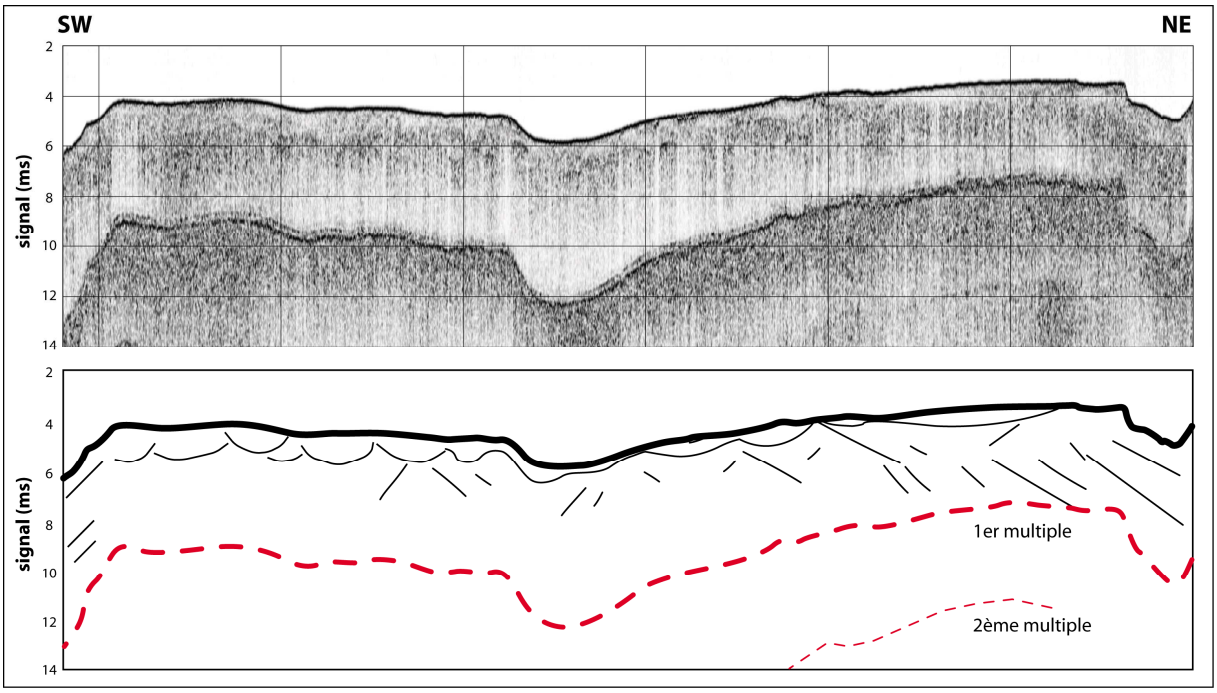


Figure 6.15. Profil sismique transversal du chenal de l'Authie.

Figure 6.15. *Seismic profile across the Authie channel.*

Tout d'abord, le profil sismique met en évidence une topographie complexe avec des niveaux globalement plus importants du Sud-Ouest vers le Nord-Est. On distingue trois incisions importantes de la séquence sédimentaire correspondant à différents chenaux. De gauche à droite du profil, on entrevoit une partie du lit du chenal principal, puis deux bras ou chenaux secondaires. Ceux-ci présentent tout deux des bordures abruptes en position méridionale et une pente plus douce vers le Nord. Bien que de profondeur comparable, le chenal Nord est plus encaissé que celui du centre et montre un terrassement de sa rive concave qui pourrait être mis en relation avec le niveau moyen de PMME. On peut noter la présence de plusieurs types de réflecteurs montrant un contraste cependant léger dans la séquence. Premièrement, il y a des réflecteurs obliques qui pourraient correspondre aux délimitations de strates d'accrétion latérale du chenal principal. Ensuite, on note des réflecteurs courbes et entrecroisés qui marquent la partie gauche du profil. Il s'agit vraisemblablement de stratifications en auge (Figure 6.11). Cette séquence montre donc une sédimentation liée à la dynamique des chenaux. On peut y observer les positions successives

de chenaux secondaires et leur comblement, ainsi que la migration du chenal principal vers le Sud, érodant actuellement les marais et engendrant une microfalaise.

2. DATATIONS ET RYTHMES DE SEDIMENTATION

Les sondages G, 25, 7 et 34 ont fait l'objet de datations isotopiques (Figure 6.16). Les deux premiers ont été analysés au CER (Brighton) et les deux derniers au laboratoire souterrain de Modane (Billon, 2001). Ces sondages sont alignés suivant un axe Nord-Sud et ont été choisis en raison d'une grande épaisseur des dépôts argileux de la partie sommitale de la séquence et de la présence de nombreuses lamines. Les mesures d'activité de ^{210}Pb et de ^{137}Cs nous ont permis de calculer les vitesses de sédimentation au sein des enregistrements sédimentaires et l'analyse de ^{60}Co et ^{241}Am a permis de préciser certains évènements. La cyclicité des lamines a pu être également déduite plus précisément grâce à l'imagerie RX.

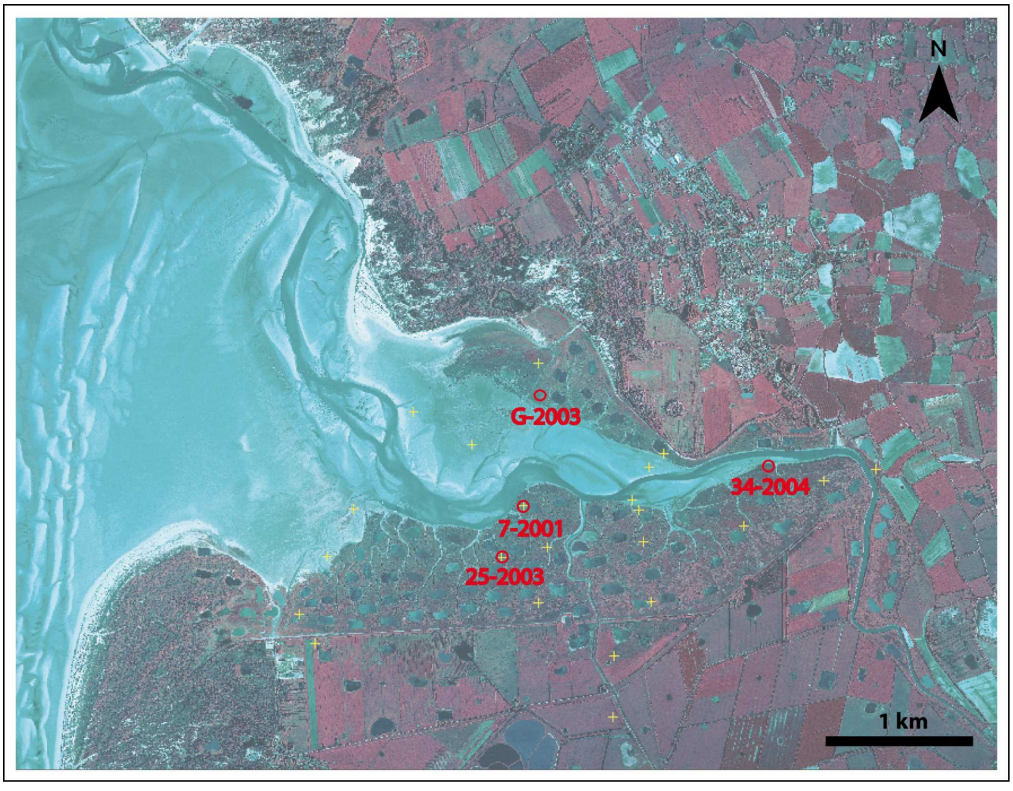


Figure 6.16. Localisation des sondages datés.

Figure 6.16. *Location of dated cores.*

2.1. SONDAGE 7

Ce sondage est situé en rive Sud au bord d'une microfalaise d'érosion liée à l'action directe du chenal principal (Figure 6.16) et a été prélevé en 2001.

La Figure 6.17 présente le profil de ^{137}Cs en fonction de la profondeur. Nous observons un premier pic à 52 cm de profondeur suivi d'un deuxième vers 39 cm et d'un dernier à 12,5 cm. Deux autres radioéléments artificiels ont enfin été examinés dans ce sondage : l'américium-241 de très longue période (T = 470 ans) et le cobalt-60 de période de 5,3 ans. Nous observons que les profils sont similaires pour ces deux radioéléments (Figure 6.17) ; ils sont donc issus de la même source. Pour le troisième pic, ces deux éléments ont une activité qui augmente fortement. L'usine de retraitement des déchets radioactifs COGEMA de la Hague semble à l'origine de ce marquage (Boust, 1999). Sa mise en service date d'ailleurs des années 1970, période en deçà de laquelle les deux radioéléments ne sont pas détectés dans notre carotte sédimentaire. La co-évolution de l'activité du ^{137}Cs avec celles du ^{60}Co et le ^{241}Am nous permet donc de dater de façon pertinente les différents pics. On peut ainsi attribuer la date de 1984 au dernier pic qui correspond à un rejet de COGEMA (web IRSN) (Annexe VI-6), cette observation ayant déjà été réalisée par Cundy *et al.* (2002) sur un marais de la baie de Somme. Le second pic est daté de 1963 et attribué aux bombes nucléaires en raison des faibles activités du ^{241}Am et de l'absence du ^{60}Co; le premier pic peut être quant à lui relié à 1954 et aux premiers essais d'armes nucléaires. En prenant ces pics indépendamment, nous obtenons ainsi des vitesses de sédimentation respectives de 0,73, 1 et 1,1 cm.an^{-1}.

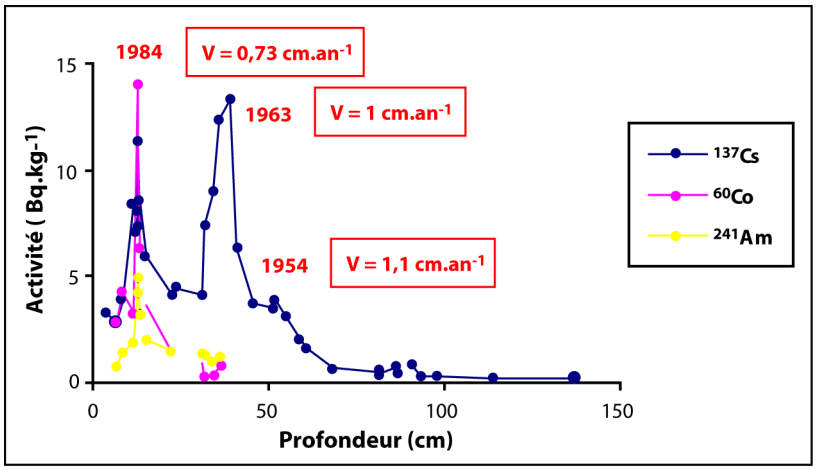


Figure 6.17. Activités mesurées du ^{137}Cs, ^{60}Co et ^{241}Am en fonction de la profondeur pour le sondage 7.

Figure 6.17. *Measured activities of ^{137}Cs, ^{60}Co and ^{241}Am as a function of depth for core 7.*

Si l'on ramène ces vitesses de calculs entre deux « évènements », nous obtenons alors 0,73 cm.an^{-1} sur la période 2007-1984, 1,26 cm.an^{-1} sur la période 1984-1963 et 1,44 cm.an^{-1} sur la période 1963-1954.

Les résultats du comptage du ^{210}Pbxs en fonction de la profondeur sont présentés en Figure 6.18. Le taux de sédimentation a été estimé grâce à la méthode de CIC (Chapitre II) à 1,2 cm an^{-1} en moyenne ce qui confirme l'ordre de grandeur obtenu par les datations. La droite de régression possède une bonne valeur de corrélation. Les différences de vitesses de sédimentation mises en évidence par les datations précédentes pourraient alors être dues à une réponse des sédiments à l'accumulation comme peut le laisser penser les différences de lithologie observées dans le sondage, avec notamment un affinement vers le haut de la carotte.

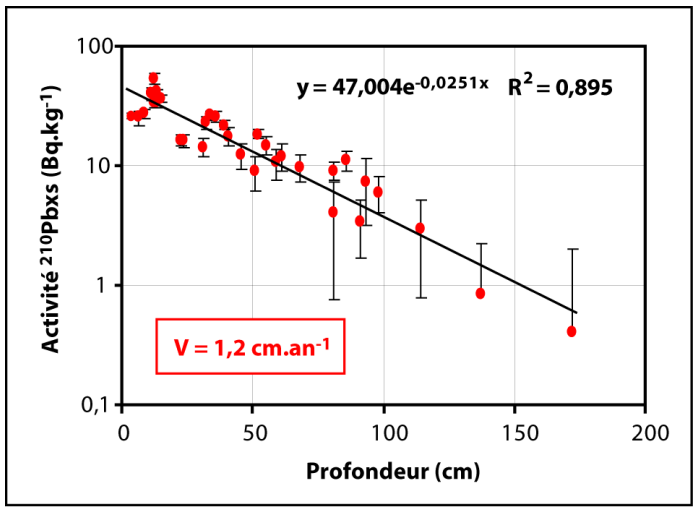


Figure 6.18. Mesures d'activités du ^{210}Pbxs en fonction de la profondeur pour le sondage 7.
Figure 6.18. *Measured activities of ^{210}Pbxs as a function of depth for core 7.*

L'analyse de la cyclicité éventuelle des lamines a été effectuée sur la carotte entière (jusqu'à 75 cm) et sur sa partie inférieure (entre 34 et 75 cm) où les lamines sont moins endommagées par la bioturbation (Annexe VI-7) grâce au logiciel Analyseries1.0 (Paillard *et al.*, 1996). La Figure 6.19 montre les fréquences des différentes harmoniques qui constituent le signal mesuré (niveau de gris mesuré sur la carotte en fonction de la profondeur). Ces fréquences sont reportées en fonction de l'inverse du pas (en cm^{-1}). Le pas est ici de 0,02 cm.

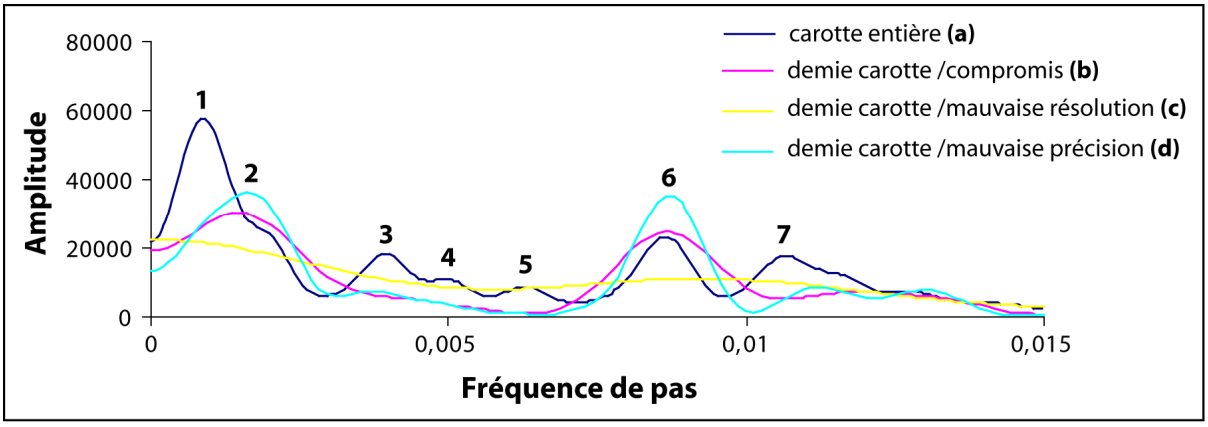


Figure 6.19. Spectres de Fourier calculés par le logiciel Analyseries 0.1.

Figure 6.19. *Fourier spectra calculated with Analyseries 0.1 software.*

Les pics 3, 4 et 5 ne sont sans doute pas significatifs. En effet Analyseries ne permet pas de tracer un bruit de fond comparable à l'incertitude statistique (Paillard *et al.*, 1996). La conversion des fréquences en cm^{-1} et en périodes des différents pics du spectre (Tableau 6.1) permet d'interpréter le signal donné par la carotte en termes de cycles de sédimentation périodiques.

Tableau 6.1. Récapitulatif des pics présents sur les quatre spectres, fréquences et périodes associées. (pas d'échantillonnage = 0,02 cm).

Table 6.1. *Synthesis of observed peaks on the four spectra, associated frequencies and periods (sample interval = 0.02 cm).*

pics	courbes concernées	Fréquence par pas	Fréquence par cm	période (cm)
1	a	0,00089	0,0448	22,32
2	b + d	0,0155	0,0775	12,90
3	a + d	0,00389	0,1945	5,14
4	a	0,00496	0,248	4,03
5	a	0,00635	0,3175	3,14
6	a + b + d	0,00870	0,4351	2,29
7	a + d	0,01095	0,5475	1,82

L'analyse en transformées de Fourier montre une nette cyclicité des dépôts qui constituent la carotte étudiée. Tous les spectres mettent en évidence des cycles d'une période voisine de 2 cm. Cette période correspond à l'alternance des fines bandes claires (dominante argileuse) et foncées (dominante sableuse), qui constitue le motif principal du signal en niveau de gris visible sur la carotte. Les cycles de 1 à 5 cm de période sont assimilés au motif

de 2 cm. Deux cycles plus longs, de périodes 13 et 22 cm, apparaissent dix fois plus grands que les premiers. Tout d'abord, l'observation des motifs de 2 cm montre qu'ils sont en fait composés de rythmites tidales liées à l'apport de plusieurs marées. En effet, ce type d'alternance est observé classiquement dans les dépôts liés aux cycles tidaux semi-lunaires d'une période de 14 jours. Les cycles plus longs observés dureraient alors de 5 à 6 mois. On aurait donc des dépôts voisins de 52 $cm.an^{-1}$ ce qui ne paraît pas du tout cohérent avec ce type de milieu même en admettant la présence de hiatus importants dans la carotte (absence ou érosion de dépôt dans la séquence sédimentaire). D'après les données de la spectrométrie gamma, le taux moyen de sédimentation calculé s'élève à 1,2 $cm.an^{-1}$. Le motif principal de 2 cm correspondrait donc à un phénomène annuel. Le schorre est seulement inondé par les marées d'équinoxe et les doublets observés peuvent être l'expression sédimentaire du cycle annuel au cours duquel alternent les périodes de dépôt important (automne, printemps) et les périodes de sédimentation plus réduite. Les cycles plus longs caractériseraient une cyclicité du dépôt sédimentaire de l'ordre de 13 et 22 ans. Ici, la sédimentation serait lente et relativement régulière.

2.2. SONDAGE 34

Ce sondage est lui aussi situé au bord d'une microfalaise d'érosion en rive Sud mais plus en amont, en face de la Madelon (Figure 6.16) et a été prélevé en novembre 2005.

L'activité du ^{137}Cs en fonction de la profondeur montre deux pics (Figure 6.20), l'un bien déterminé à 90 cm et un second nettement moins marqué entre 20 et 40 cm. Les données concernant ^{60}Co et ^{241}Am sont difficiles à interpréter en raison de leur importante activité de base. Leur covariance avec la profondeur semble ici également moins évidente. Le premier pic peut être cependant imputé à 1984 pour les mêmes raisons précédemment évoquées. La vitesse de sédimentation est estimée à 4-4,2 $cm.an^{-1}$. Le deuxième pic est difficile a dater en l'absence d'un évènement clairement corrélable. Il pourrait être attribué à la dernière augmentation des rejets de la Hague en 1993-1994 avant que ceux-ci deviennent presque nuls (Annexe VI-6). Dans ce cas, on obtiendrait des vitesses de sédimentation de l'ordre de 2,3 $cm.an^{-1}$ entre 0 et 28 cm et 6 $cm.an^{-1}$ entre 28 et 90 cm.

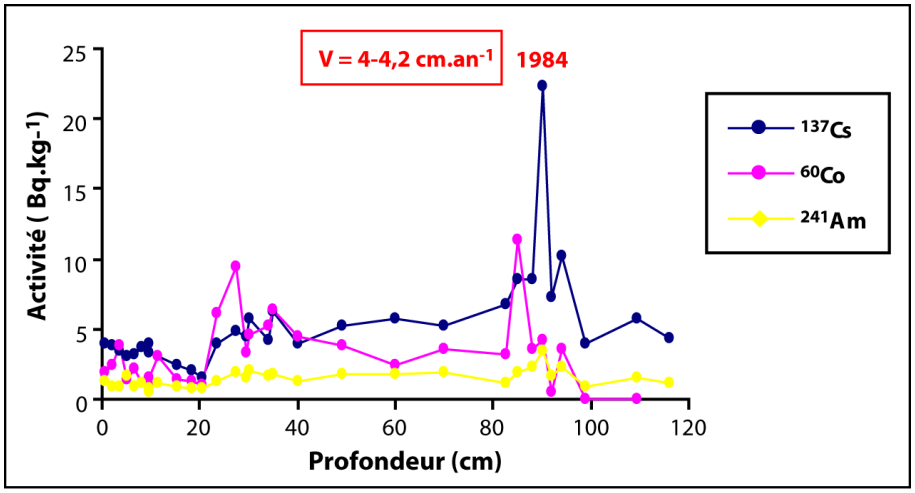


Figure 6.20. Activités mesurées du ^{137}Cs, ^{60}Co et ^{241}Am en fonction de la profondeur pour le sondage 34.

Figure 6.20. *Measured activities of ^{137}Cs, ^{60}Co and ^{241}Am as a function of depth for core 34.*

Les résultats du comptage du ^{210}Pbxs en fonction de la profondeur sont présentés en Figure 6.21. La vitesse de sédimentation moyenne a été estimée à 4 cm.an^{-1}. Cependant le coefficient de corrélation très faible de la droite de régression indique différentes vitesses de sédimentation au sein de l'enregistrement. Ces vitesses montrent une décroissance du bas vers le haut du sondage avec les estimations suivantes en décomposant le profil en deux parties : 7 cm.an^{-1} (20-120 cm) puis 0,7 cm.an^{-1} (0-20 cm).

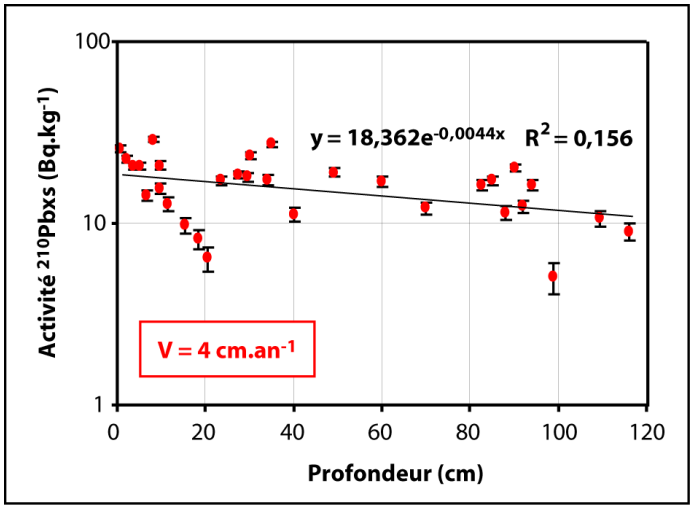


Figure 6.21. Activités mesurées du ^{210}Pbxs en fonction de la profondeur pour le sondage 34.

Figure 6.21. *Measured activities of ^{210}Pbxs as a function of depth for core 34.*

2.3. SONDAGE 25

Cette carotte a été prélevée en avril 2003 sur le haut schorre en rive Sud de l'estuaire (Figure 6.16). Les échantillons analysés sont plus espacés dans ce sondage ci et le suivant bien qu'ils aient été échantillonnés avec la même résolution que précédemment ; une deuxième série d'analyse de quelques points intermédiaires et pertinents est envisagée ultérieurement.

Le premier pic d'activité du ^{137}Cs à 30 cm (Figure 6.22) est associé avec une activité du faible du ^{241}Am et une absence du ^{60}Co (Reyss, comm. pers.) et peut être attribué aux bombes nucléaires en 1963. Le deuxième pic à 20 cm est trop mal dessiné pour tenter une interprétation cohérente et donc de le dater correctement. Nous obtenons une valeur de sédimentation de 0,7 cm.an^{-1}.

La courbe du ^{210}Pbxs en fonction de la profondeur possède ici une bien meilleure régression et le taux de sédimentation est estimé à 1,6 cm.an^{-1} (Figure 6.23). Il s'agit d'une valeur moyenne car elle est basée sur l'hypothèse d'un flux constant de Ra et d'une sédimentation constante. Le recoupement de nos valeurs de datation obtenues nous permet de mettre en évidence une un hiatus sédimentaire important ou un épisode érosif.

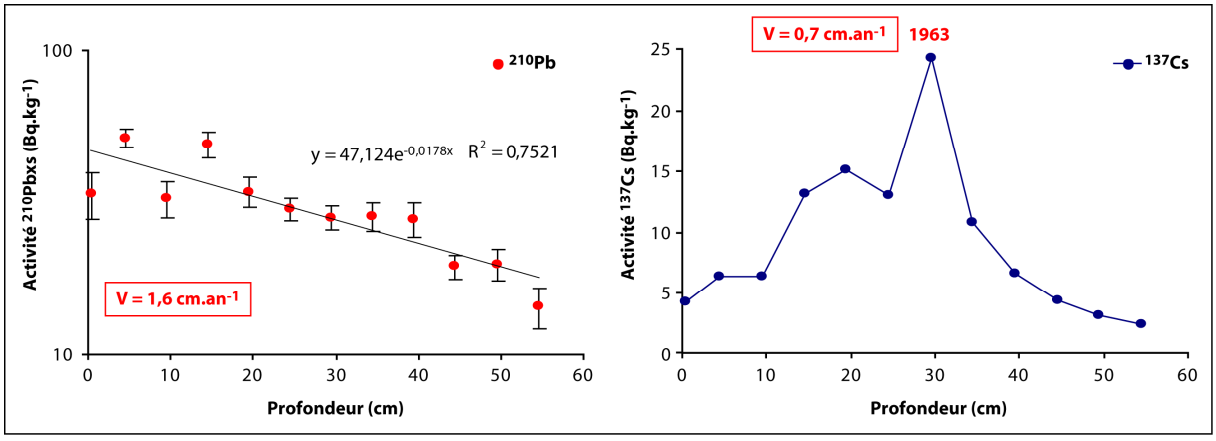


Figure 6.22. Activités mesurées du ^{210}Pbxs et du ^{137}Cs en fonction de la profondeur pour le sondage 25.

Figure 6.22. *Measured activities of ^{210}Pbxs and ^{137}Cs as a function of depth for core 25.*

2.4. SONDAGE G

Cette carotte a été prélevée en février 2004 sur le bas schorre d'un marais néanmoins mature en rive Nord de l'estuaire (Figure 6.16).

On observe ici aussi un pic principal de ^{137}Cs à 35 cm (Figure 6.23) qui correspond à 1963 également. La vitesse de sédimentation est donc estimée à 0,8 cm.an^{-1}.

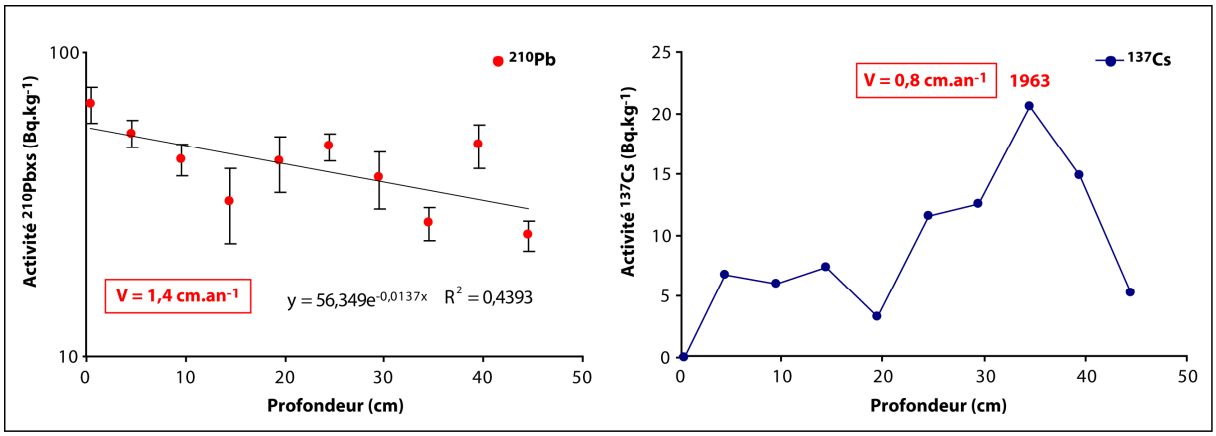


Figure 6.23. Mesures d'activités du ^{210}Pbxs et du ^{137}Cs en fonction de la profondeur pour le sondage G.

Figure 6.23. *Measured activities of ^{210}Pbxs and ^{137}Cs as a function of depth for core G.*

D'après l'activité du ^{210}Pb en excès, le taux de sédimentation a été estimé à 1,4 cm.an^{-1} (Figure 6.23). La droite de régression possède cependant une corrélation faible ce qui suppose un changement de régime de sédimentation au cours du temps. En décomposant le sondage, du bas de l'enregistrement jusqu'à 20 cm, on observe un taux de sédimentation de 0,8 cm.an^{-1}. A partir de 20 cm de profondeur jusqu'en haut de l'enregistrement, la vitesse de sédimentation est plus faible et de l'ordre de 0,3 cm.an^{-1}. Ces deux régimes de sédimentation, qui se succèdent dans la séquence, sont cohérents avec la granulométrie observée dans le sondage. En effet, cette dernière est fortement argileuse et stratifiée jusqu'à 20 cm et, à partir de cette profondeur, les dépôts sont plus homogènes, et les teneurs en silts et sables augmentent sensiblement.

3. EVOLUTION DES UNITES GEOMORPHOLOGIQUES

3.1. EVOLUTION DU DOMAINE DE L'EMBOUCHURE

Les positions respectives du poulier et du musoir ont évolué conjointement au cours du temps. On peut observer la translation vers le Nord du pied de dune matérialisant le trait de côte (Figure 6.24).

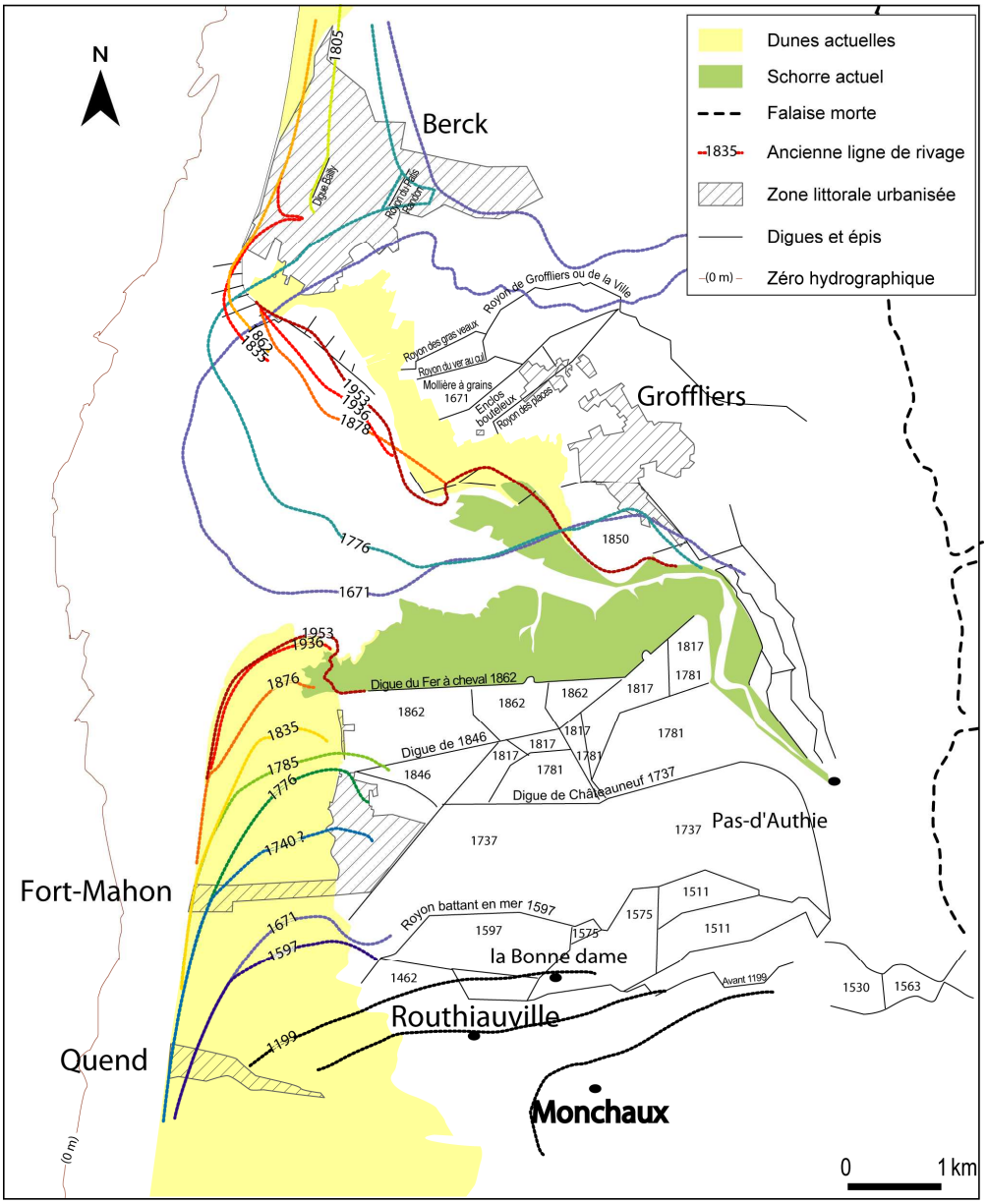


Figure 6.24. Evolution du trait de côte depuis 1199 réalisée à partir de photographies aériennes et de cartes anciennes (d'après Dobroniak, 2000).

Figure 6.24. *Shoreline evolution since 1199 realised with aerial photographs and ancient maps (from Dobroniak, 2000).*

Cette évolution de la position de la ligne de rivage est caractérisée par une forte avancée en rive Sud et un recul important en rive Nord. Ce couplage dynamique est réalisé par le biais du chenal qui, repoussé par l'exhaussement du poulier, est en mesure d'éroder activement le secteur du musoir, aidé en cela par des vagues de tempêtes liées à des houles de Sud-Ouest (Dobroniak, 2000). L'axe de l'estuaire se redresse ainsi progressivement jusqu'à une situation sub-horizontale en direction du Nord (Figure 6.24).

Sur la rive Nord, des travaux de comparaison de photographies aériennes entre 1947 et 2000 (Dutry, 2001) ont permis de mettre en évidence une différenciation des cellules sédimentaires (érosion/accrétion) au cours des années et leur cinétique en relation avec les aménagements de défense côtière successivement entrepris. Ainsi, une translation du front d'érosion dunaire a pu être observée à moyen terme vers l'intérieur de l'estuaire, le recul observé étant toutefois moins marqué en amont. Témoignant d'une accrétion plus au sud, une flèche sableuse s'est mise en place. A plus court terme, un suivi topographique étroit à haute résolution spatio-temporelle entrepris dès 1997 a permis de quantifier cet exhaussement (comparaison de profils) et de caractériser la progression de cette flèche vers l'intérieur de l'estuaire à l'aide de modèles numériques de terrain (Figure 6.25).
On peut noter un allongement de la flèche vers le Sud-Sud Est accompagné d'une accrétion considérable des niveaux les plus hauts ainsi que d'un exhaussement de l'arrière flèche qui favorise la formation de dunes embryonnaires. Cet engraissement a été marqué par le développement de cordons de dunes embryonnaires dont la progression a été estimée à 11 m par an en direction du chenal. Les comparaisons de levés plus rapprochés ont permis de constater que cette progression est beaucoup plus rapide lors d'évènements de forte agitation et lorsque le chenal se rapproche (Dobroniak, 2000).

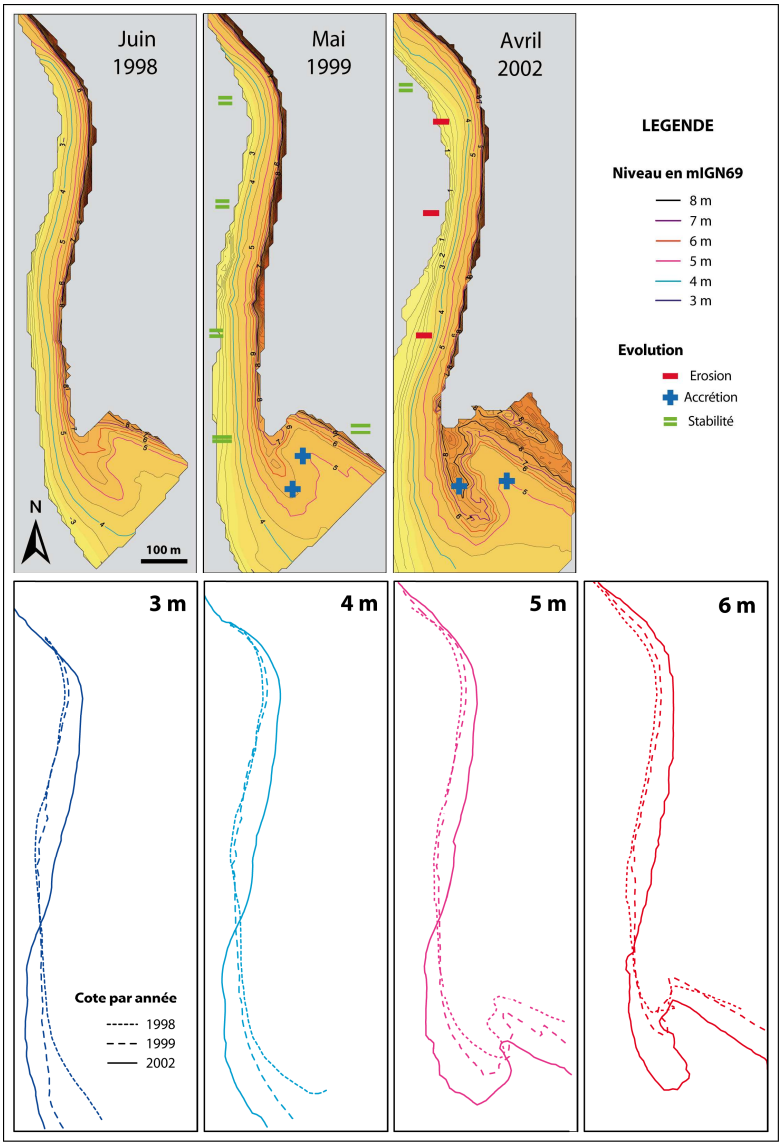


Figure 6.25. Evolution topographique de la flèche sableuse interne.

Figure 6.25. *Topographic evolution of the internal sand spit.*

3.2. EVOLUTION DU CHENAL PRINCIPAL

Comme nous l'avons vu précédemment, le chenal principal est composé de plusieurs bras. La Figure 6.26 représente les différentes positions du lit principal de l'Authie au cours du temps. On peut observer un certain effet de canalisation de celui-ci entre 1905 et 1913 réalisé par l'installation de la digue Barrois de 1868 jusqu'en 1884. Puis, le chenal principal migre progressivement selon deux tendances : un mouvement vers le Nord et un autre vers l'Est. Il est alors de nouveau contraint par la digue submersible et les épis en rive Nord.

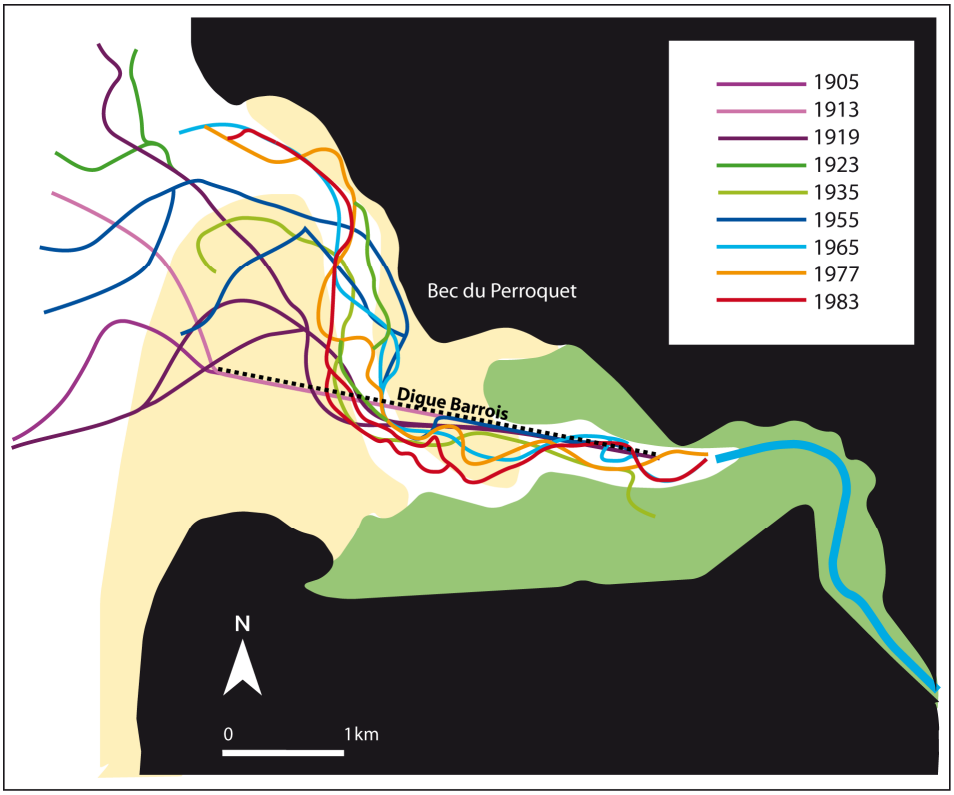


Figure 6.26. Positions de l'axe du chenal de l'Authie au cours du siècle (d'après Dobroniak, 2000).
Figure 6.26. *Authie channel axis positions during the last century (from Dobroniak, 2000).*

Ces deux translations semblent étroitement liées à l'accrétion et l'élargissement du poulier sur la rive Sud qui a repoussé progressivement l'écoulement du chenal d'une part, mais également à l'exhaussement des fonds qui a autorisé le franchissement de la digue. Bien que partiellement ensablée actuellement, la digue continue à jouer son rôle en amont où on peut encore l'apercevoir régulièrement dans ce secteur. Elle a été observée consécutivement à une forte érosion du schorre en rive Sud en partie médiane et en rive nord au niveau de la Madelon où la berge concave à due être confortée en 2003 par des fascinages pour protéger les habitations riveraines (Chapitre III). Bien que les aménagements anthropiques et l'évolution de la morphologie participent activement à une canalisation du chenal, celle-ci reste relative et donne lieu à la création d'un espace de divagation de ses différents bras. Cet espace est composé de nombreux bancs sableux dont la dynamique contrôle en partie l'ouverture ou le comblement des bras secondaires. Parallèlement, un certain encaissement du lit principal a pu être observé au cours du temps, tendance confirmée par à l'évolution de la bathymétrie de l'embouchure estuarienne (Figure 6.27). Cet approfondissement serait une réponse morphologique secondaire due à l'accrétion naturelle de l'estuaire qui pourrait avoir été intensifiée par la poldérisation rapide de l'Authie au cours du XX^{ème} siècle (Anthony et

Dobroniak, 2000). En effet, le même volume oscillant devant se répartir sur des espaces réduits, les chenaux estuariens ont tendance à s'approfondir (Pethick, 1996 ; Van der Speck, 1997). Pethick (1996) souligne que la même réponse morphodynamique est généralement observée lors d'une hausse du niveau marin. On observe simultanément un rétrécissement du delta de jusant.

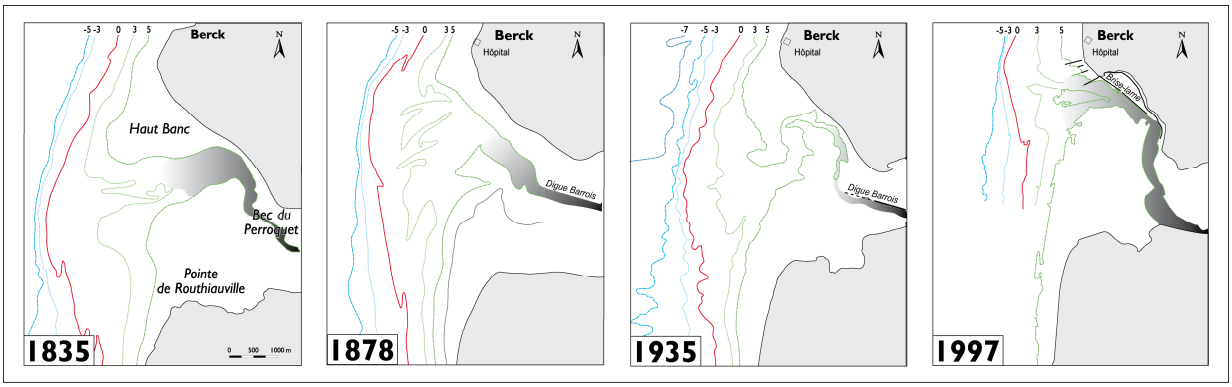


Figure 6.27. Evolution de la bathymétrie du chenal principal et de l'avant-côte (d'après Dobroniak, 2000).

Figure 6.27. *Near-shore and Authie channel bathymetric evolution (from Dobroniak, 2000).*

3.3. EVOLUTION DU SCHORRE

Les marais ont progressé d'amont en aval et vers le centre de l'estuaire au fur et à mesure que les successives positions du trait de côte ont créés des zones d'abri propices à l'accumulation de sédiment fin (Figure 6.28). L'évolution des marais est donc un bon indicateur de la progression du colmatage de l'estuaire. L'accroissement de leur surface s'est cependant fait de façon inégale au sein de l'estuaire.

Le schorre en rive Sud s'est établi en premier et présente les surfaces les plus importantes évaluées à 550 ha actuellement. Leur progression a été estimée à 3,5 ha par an sur la période investiguée. On peut noter que le réseau de chenaux s'est considérablement complexifié dans ce laps de temps, les chenaux montrent quant à eux un rétrécissement notable qui suggère leurs approfondissements. La rive Nord a été colonisée plus tardivement par les marais notamment sous l'influence du développement de la flèche interne. De 1965 à 1997, sa surface a pratiquement doublé avec une estimation de son accroissement à 1 ha par an. Etant donné la taille relativement réduite de la zone potentiellement propice à l'installation de marais, on peut déduire qu'elle a été l'objet d'une accrétion massive. Si on compare

cependant les taux de progression, on peut conclure que la poldérisation de la rive Sud a eu un effet bien plus spectaculaire sur le colmatage estuarien que la dynamique des flèches sableuses.

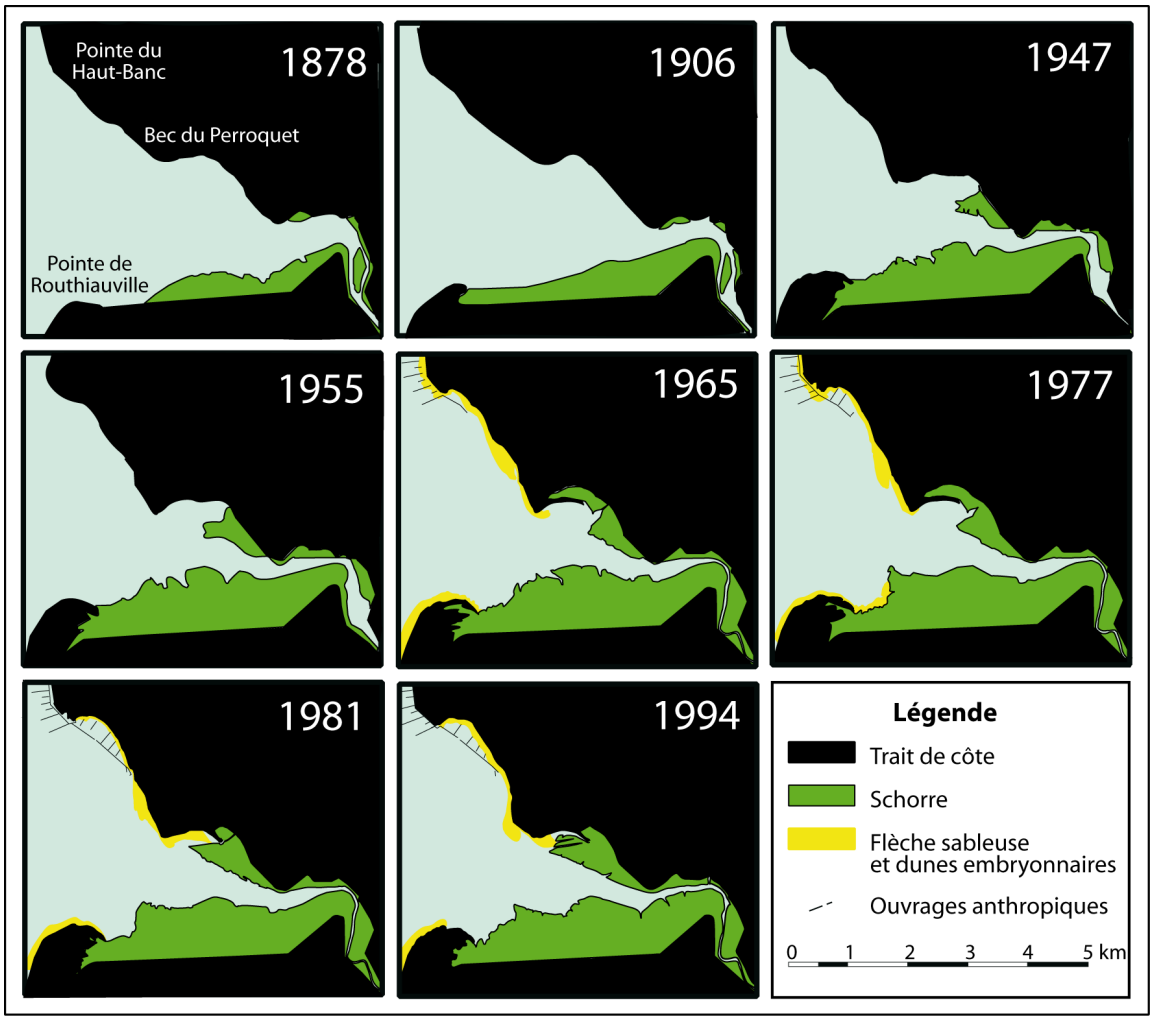


Figure 6.28. Progression du schorre depuis 1878 réalisées à partir de photographies aériennes et de cartes anciennes (d'après Dobroniak, 2000).

Figure 6.28. *Salt marsh progression since 1878 from aerial photographs and ancient maps (from Dobroniak, 2000).*

CONCLUSION

L'étude des environnements côtiers récents qui se sont succédés dans le temps et de leur évolution nécessite une approche pluridisciplinaire. La géophysique et les analyses stratigraphiques ont permis une étude globale des architectures sédimentaires (sismique haute résolution, géoradar) et des successions environnementales (coupe stratigraphique) mais aussi une observation et un échantillonnage précis des enregistrements sédimentaires (sondages et analyses). L'étude historique de différents documents anciens et les données stratigraphiques accompagnées d'éléments de datation ont permis une investigation spatio-temporelle des variations de la distribution et de la vitesse de dépôt des sédiments fins.

La reconstruction de l'évolution à moyen terme des espaces de sédimentation fine, à la fois dans leurs dimensions horizontale et verticale, a mis en évidence une accélération du comblement général de l'estuaire ainsi qu'une migration de son axe vers le Nord. La dynamique du chenal principal a joué un rôle primordial dans cette évolution, en tant que vecteur d'apports sédimentaires mais également en tant que forçage majeur de leur condition de dépôt et/ou érosion. L'impact anthropique ne peut ici cependant pas être sous estimé. La poldérisation a réduit assez brusquement l'espace soumis à la marée (espace d'accueil) et ce sans variation notable du volume du prisme tidal. La même quantité de sédiments s'est déposée sur un espace moins important et ainsi engendré une accrétion plus grande. Cette réponse morphologique a permis notamment aux marais de progresser très rapidement grâce à des cotes altimétriques devenues plus propices à la colonisation par les végétaux halo-tolérants.

La sédimentation de cet estuaire n'a pas été constante ni dans l'espace ni dans le temps. On remarque de grandes différences de vitesse de sédimentation dans un même sondage, celle-ci étant généralement plus faible pour les couches les plus récentes, mais également entre le taux de sédimentation fine d'un marais mature ou d'un marais plus jeune comme l'ont souligné différents auteurs (Chmura *et al.*, 2001 ; Haslett *et al.*, 2003). La granulométrie et les processus de compaction inhérents aux sédiments fins ainsi qu'à la matière organique seraient largement impliqués dans ces observations. Le taux de compaction reste cependant difficile à évaluer et nécessite l'application d'une méthodologie complexe (Allen, 2000b).

INTRODUCTION

Cette thèse s'est attachée à caractériser les mécanismes responsables du transport des éléments fins et de leur dépôt dans un estuaire mixte co-dominé par la marée et la houle. Ces mécanismes ont été abordés à différentes échelles spatio-temporelles afin de mettre en évidence des cyclicités éventuelles et de souligner certaines interactions avec les organismes vivants ainsi que les réponses morphodynamiques. Le rôle de la sédimentation fine dans le cadre du comblement de l'estuaire a ensuite été envisagé à travers une étude stratigraphique.

Ce chapitre de synthèse se propose de reprendre les points essentiels qui ont été abordés dans les chapitres précédents. Imposée par la diversité et la complexité des processus en action en domaine estuarien, la pluridisciplinarité de ces travaux a tout d'abord été accompagnée par une forte volonté méthodologique dans la mise en œuvre des acquisitions. L'intérêt de cette « boîte à outils » appliquée à l'étude des espaces estuariens sera illustré à travers quelques exemples. L'investigation des processus de sédimentation fine a été réalisée à travers différentes échelles de temps et d'espace. Ces aspects pluri-échelles seront notamment discutés plus largement dans ce chapitre à travers les processus de sédimentation à court terme, les interactions entre la morphologie et les aspects dynamiques. Les implications écologiques seront également envisagées par le biais de deux aires majeures de sédimentation fine et des espèces clefs : les marais salés avec notamment la spartine anglaise et les vasières à travers le macrozoobenthos.

1. METHODOLOGIE APPLIQUEE AUX ESPACES ESTUARIENS MIXTES

Notre travail s'est intéressé à l'étude des particules en suspension dans les masses d'eau, à leur nature et à la quantification de leurs flux dans l'estuaire ainsi qu'à l'expression verticale de leur sédimentation. La sédimentation est un terme qui englobe une large gamme d'échelles de temps et de processus physiques, chimiques et biologiques (Thomas et Ridd, 2004). Dans la connaissance de la sédimentation des milieux estuariens, les chercheurs ont souvent été partagés entre plusieurs exigences : celle d'avoir des données originales et à haute résolution à même d'éclairer sur les processus en action d'une part et celle d'avoir des données simples qui puissent être comparées à des acquisitions sur d'autres sites pour dégager des cadres généraux d'autre part. Une seconde dualité se dessine également entre les acquisitions courtes, pluri paramètres à haute fréquence, et les suivis de quelques paramètres

simples à plus long terme. Dans le cadre de cette thèse, ces aspects n'ont pas été abordés en opposition mais plutôt comme des moyens complémentaires d'étude de la complexité des processus (Marion *et al.*, 2005). Les méthodes utilisées et replacées dans leur contexte d'espace et de temps sont résumées en Figure 7.1.

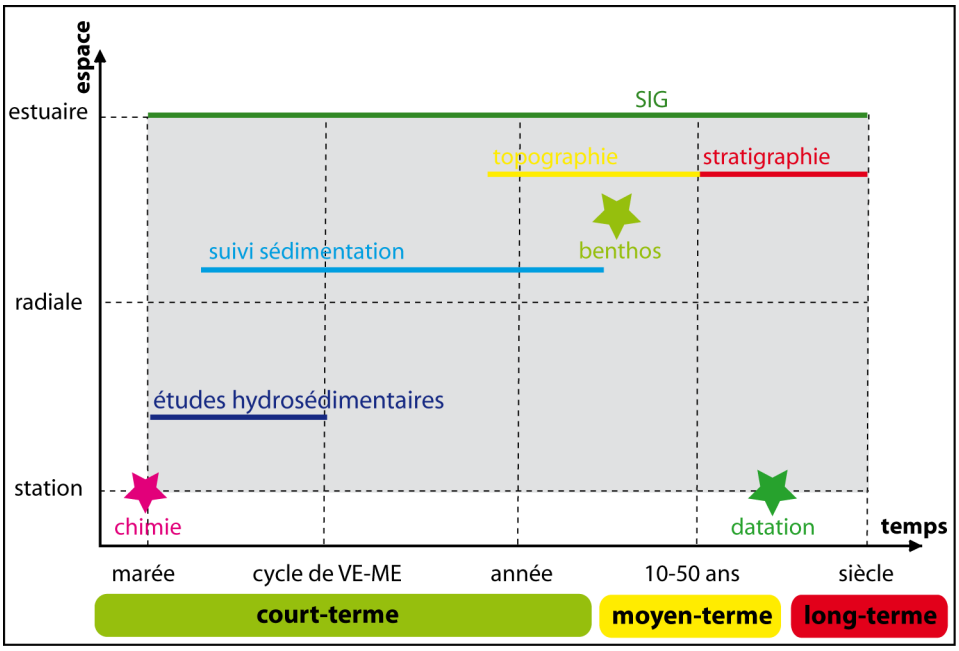


Figure 7.1. Représentation schématique des techniques d'études dans leur contexte spatio-temporel.

Figure 7.1. *Schematic view of study techniques in their spatio-temporal framework.*

Les techniques employées sont elles mêmes adaptées à différents types d'observation ainsi qu'à des environnements d'énergie différentes. La principale difficulté en Authie a été de faire face à un milieu très énergétique et présentant un sédiment mixte. De nombreuses techniques ont en effet été mises au point pour un type de sédiment en raison de leur sensibilité à certains critères. Ainsi, nous avons entrepris des pompages afin de pouvoir comparer nos résultats à ceux obtenus sur d'autres sites. Cependant, les concentrations pondérales obtenues sont très influencées par la présence de sables et sablons ce qui s'avère très limitant pour l'étude des particules les plus fines. Nous avons donc privilégié des instruments optiques, en raison de la forte obscuration réalisée par les vases (Bunt *et al.*, 1999). L'ASM-IV a été calibré grâce aux sédiments fins que l'on retrouve sur les vasières et de manière a discriminer favorablement les particules fines (Marion *et al.*, 2004) même si il a été ensuite utilisé également dans le chenal principal. Ce choix méthodologique nous a été imposé en raison de la difficulté de recalibrer constamment l'appareil en fonction du site où il

serait déployé et de l'observation suivante : le sédiment transporté à un temps t n'est pas toujours celui qui se dépose ou s'est déposé sur place. Ce simple constat mais aussi la diversité des mélanges sablo-vaseux possiblement rencontrés sur de courtes distances en Authie, en raison des forts gradients physiques qui caractérisent l'estuaire, rendent de telles investigations difficilement concevables a priori. Les capteurs optiques nous ont permis de discriminer ainsi et à son tour le sédiment fin dans les MES. Cependant, comme nous l'avons évoqué au Chapitre I, les particules fines transitent également sous la forme de flocs qui se forment et/ou se désagrègent au cours de la marée. Les faibles quantités de MES en Authie ainsi que la fragilité des structures de ces agrégats rendent la quantification des flocs impossible en laboratoire. Cette information a pu être cependant obtenue par l'utilisation du LISST-25X. Bien que moins sophistiqué que les modèles développés ensuite, capables de mesurer la granulométrie in-situ sur 32 classes de taille ou les vitesses de chutes des populations de particules (LISST-100 et LISST-ST) (Agrawal et Pottsmith, 2000 ; Styles, 2006), cet instrument permet de quantifier la concentration volumique des particules ainsi que leur diamètre moyen sur toute la gamme et sur celles supérieures à 63 µm. Cette information est primordiale dans nos études, non plus pour distinguer le sable de la vase mais pour caractériser les présences de flocs et pour préciser leur taille.

Les aspects hydrodynamiques ont été analysés sur le court terme mais le transport sédimentaire a pu être appréhendé par des suivis avec une information discontinue (pompage bi-mensuel sur chaque marée de vives eaux) mais également continue sur le court terme (déploiement d'ASM-IV sur un cycle semi-lunaire) et le moyen terme (trois stations ESST relevées sur deux années). Ces derniers types d'acquisition en continu sont assez novateurs dans l'étude du transport sédimentaire sur les espaces intertidaux et pourront montrer des applications très intéressantes en relation avec des mesures d'accrétion à cette résolution (Lawler, 2005 ; Deloffre, 2005).

L'ASM-IV se révèle être un outil très intéressant en raison de son autonomie importante à faible fréquence mais aussi sa capacité à travailler sur quatre marées d'affilée à 1 Hz. L'obtention de profils de concentrations en MES sur le premier mètre de la colonne d'eau est encore peu commune à cette résolution dans la littérature et se révèle cruciale dans les études hydrosédimentaires. L'instrument permet notamment la détection des mouvements du lit de sédiment et des phases de remise en suspension ainsi que la caractérisation de ségrégation éventuelle des matériaux fins dans les masses d'eau. Le ESST permet lui aussi d'obtenir une information sans discontinuité sur la quantité de MES en mouvement dans la

colonne d'eau. Il permet de plus d'analyser ultérieurement les propriétés chimiques, minéralogiques et granulométriques des sédiments, une des applications directe étant l'évaluation et la prédiction des flux de contaminants.

La diversité la plus importante de techniques a été employée en ce qui concerne l'étude des dépôts de sédiment. La fréquentation humaine de l'estuaire et le fort hydrodynamisme de celui-ci ont alors été les principales contraintes.

La quantification des apports sur les marais a pu être réalisée par l'intermédiaire de systèmes de porte filtre. Ce type d'outils a été largement employé dans différents marais (Reed, 1988 ; Brown, 1998 ; Day *et al.*, 1998). Différents essais ont été menés avec les techniques développées par les auteurs précités (Dobroniak, 2000) mais les résultats se sont révélés peu concluants et significatifs en raison du fort hydrodynamisme de l'Authie. Nous avons finalement choisi un système utilisé préalablement en baie du Mont Saint Michel (Jigorel, 1996) et donc particulièrement bien adapté à des schorres où les vitesses de courant peuvent être élevées. Ces systèmes discrets et profondément enfoncés dans le substrat ont permis un suivi à moyen terme en minimisant les lacunes occasionnées par les actes de vandalisme et le déplacement des structures par les courants de marées.

L'expression verticale dans le profil lithologique de ces apports de sédiments fins a ensuite été étudiée. Les suivis par l'implantation de piquets (Day *et al.*,1998) n'ont pas pu être réalisés et en raison des fréquentes perturbations occasionnées par les visiteurs qui rendent ses résultats peu fiables. Différents types d'horizons marqueurs (Harrison et Bloom, 1977 ; Cahoon et Turner, 1989 ; French et Stoddart, 1992 ; French *et al.*, 1995 ; Leonard, 1995) ont été testé mais n'ont pas montré de résultats satisfaisants sur les surfaces très envasées et colonisées par des végétaux. Ces difficultés s'expliquent tout d'abord par le manque de matériel de carottage à la fois précis et approprié pour les sédiments meubles, à même d'éviter un tassement artificiel lors du prélèvement (voir par exemple Cahoon *et al.*, 1996) qui discrédite toute entreprise de quantification réaliste de l'accrétion. De plus, le type de végétation en place à également compromis ce genre d'investigation (voir par exemple Bartholdy *et al.*, 2000). Nous avons donc choisi de travailler préférentiellement sur les variations de l'élévation des surfaces végétalisées qui prennent en compte à la fois l'accrétion, la réponse des sédiments lors de l'accumulation et les interactions biologiques à grâce au RSET (Figure 7.2). A son utilisation en conjonction avec des horizons marqueurs qui permet d'apprécier les phénomènes de compaction qui interviennent dans le profil sédimentaire (Cahoon *et al.*, 1995) et d'apporter un éclairage sur la part des processus responsables de

l'élévation des marais (Figure 7.2), il a été préféré l'utilisation des données altimétriques de l'Altus sur la vasière proche (Deloffre, 2005). L'implantation peu profonde de la structure de l'instrument ainsi que l'absence d'horizon de végétation fournit une base de comparaison intéressante pour mettre en évidence les effets de compaction dans la zone dite de subsidence peut profonde.

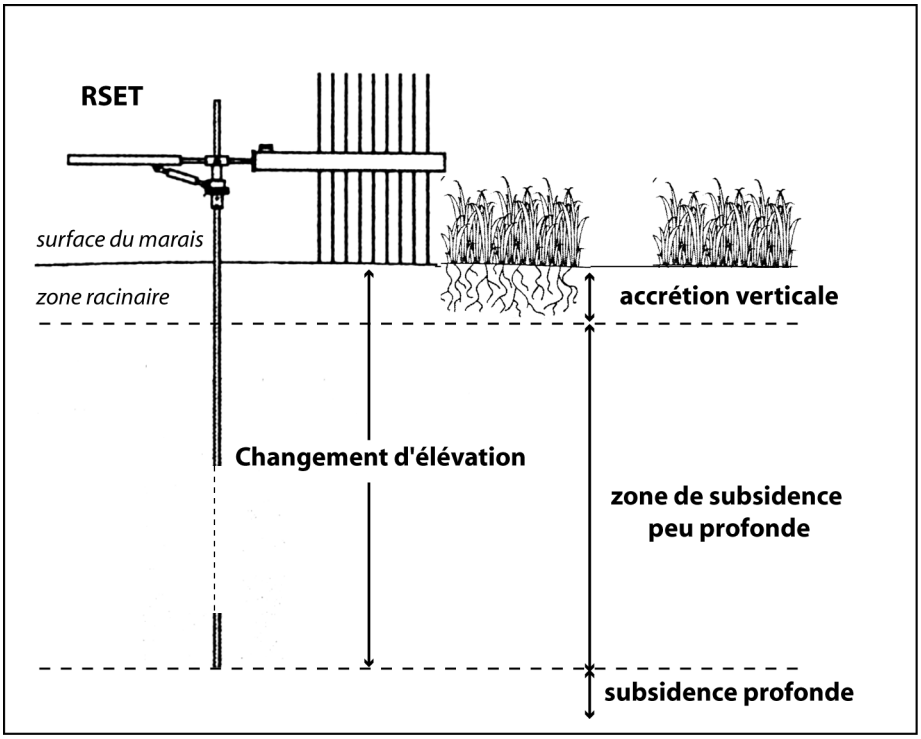


Figure 7.2. Principe de la mesure effectuée par le RSET (d'après Cahoon *et al*., 1995).

Figure 7.2. *RSET measurement principle (from Cahoon et al., 1995).*

D'après Thomas et Ridd (2004), les taux d'accumulation sur 1000 ans datés au ^{14}C sont plus petits d'un facteur 4 à 10 par rapport à ceux réalisés sur une échelle saisonnière à annuelle et quantifiés respectivement par la méthode d'horizons marqueurs (Parkinson *et al*., 1994) et de pièges à sédiment (Courp et Monaco, 1990). De nombreux processus interviennent à la surface du sédiment et/ou dans le profil sédimentaire et expliquent ces différences. Cahoon et Lynch (1997) recensent les facteurs suivants qui peuvent intervenir sur le bilan d'accumulation nette en fonction de l'échelle de temps considérée : la décomposition de la matière organique, la dissolution de certains minéraux, l'érosion, les resuspensions, le transport par saltation pour les particules les plus grossières et la compaction. Sur le même pas de temps, nous avons calculé un facteur 17 entre la mesure de l'accrétion réalisée sur la vasière et le changement d'élévation sur le marais adjacent, estimée à 0,75 cm.an^{-1}. Les

résultats issus de la méthode cartographique, grâce à la limite caractéristique du schorre dans la séquence de sédiment et l'estimation de son âge grâce à des documents anciens et photographies aériennes, ainsi que des différentes datations (Trentesaux *et al.*, 2003a) montrent des taux de sédimentation moyens de l'ordre de 1 cm.an^{-1}. En détaillant les données de l'activité de certains éléments (^{210}Pb et du ^{137}Cs mais aussi ^{241}Am et ^{60}Co), on s'aperçoit que les vitesses de sédimentation ont considérablement varié au cours du temps. Ces différences de rythmes de sédimentation observées sur la colonne sédimentaire sont imputables aux types de sédimentation qui se sont succédées dans le temps. Les vitesses diminuent ainsi significativement du bas vers le haut des sondages réalisés mais ce constat prend en compte également une compaction importante et différenciée du sédiment selon sa nature.

2. PROCESSUS DE SEDIMENTATION FINE A COURT TERME

Comme nous l'avons évoqué au Chapitre I, la dynamique des MES est particulièrement complexe en milieu estuarien. Cette complexité est liée à l'interaction des masses d'eau douce et salée et aux aspects hydrodynamiques. En Authie, différentes études hydrologiques nous ont permis de conclure à la mixité des masses d'eau (Chapitre IV) comme le suggéraient les caractéristiques morphologiques de l'estuaire (Chapitre III). Même si un mélange important des masses d'eau est réalisé, on peut parfois observer une faible stratification lors du jusant en raison des affluents dont les apports d'eau douce restent cependant mineurs. La salinité observée montre donc une corrélation parfaite avec le marnage de la marée étudiée. Les études de MES ont permis de détecter la présence d'un maximum de turbidité. En l'absence d'un front salin, ce point nodal peut être formé par la marée dynamique à travers un jeu d'asymétrie de la celle-ci. Cette théorie est étayée par les courants observés dans le chenal principal d'amont en aval et décrits dans le Chapitre III. A l'embouchure, la marée est dominée par le flot en raison de l'intensité du courant car l'allure de la courbe des hauteurs d'eau reste symétrique autour de la pleine mer. Au niveau de l'estuaire moyen, les vitesses de courants se renforcent encore sur la phase montante de la marée mais la durée du jusant s'allonge. En progressant encore vers l'amont, la courbe de marée présente une allure très asymétrique et l'étale de pleine mer précède ici largement celle que l'on peut observer à l'embouchure. Cette pompe tidale favorise un transport sédimentaire vers l'amont (Marion, 2003 ; Marion *et al.*, 2004) à travers une remise en suspension

importante lors du flot qui permet une concentration des MES dans la masse d'eau au fur et à mesure de la propagation de l'onde de marée dans l'estuaire puis une décantation plus importante des particules à l'étale de haute mer (Salomon et Allen, 1983 ; Sottolichio, 1999).

La ségrégation des MES a lieu sur les trente premiers centimètres de la colonne d'eau quelque soit le site observé. La concentration en MES au fond subit des variations au cours de la marée en relation avec les influences des pics de vitesse des courants principalement lors du flot mais également au jusant. Les seuils de vitesse moyenne de courant capable d'une remise en suspension des sédiments varient suivant la nature du substrat, autour de 0,06 $m.s^{-1}$ sur surfaces très envasées (vasières et marais) et jusqu'à 0,12-0,4 $m.s^{-1}$ dans les chenaux dont les lits sont composés également de sédiments plus grossiers, soulignant la difficulté d'appréhender les mélanges de sédiments mixtes (Mitchener *et al*., 1996 ; Torfs *et al*., 1996). La composante verticale du courant, lorsque celle-ci est dirigée vers le fond, a une influence significative sur les resuspensions observées dès de faibles valeurs de l'ordre de 0,025 $m.s^{-1}$. Sur les hauts niveaux topographiques, on observe également une alternance de la domination de l'écoulement général, successivement par les composantes longitudinale et transversale. Cette dynamique, que l'on peut observer à plus petite échelle suivant un axe le plus souvent perpendiculaire lors de débordement et vidange des chenaux de marée, favorise le transport de sédiment vers les hauts niveaux et leur sédimentation sur place par le biais de deux processus : la décantation des particules lors de l'étale de haute mer quand les courants s'annulent et une remise en suspension en fin de jusant due à l'accélération des courants qui occasionne finalement une sédimentation brutale quand les masses d'eau quittent l'estran. Malgré des concentrations pondérales relativement faibles (autour de 400 $mg.l^{-1}$), la présence avérée de macroflocs permet un transport des sédiments fins sur de longues distances et un approvisionnement constant des aires intertidales. Leurs vitesses de chute importantes lorsque les courants s'affaiblissent permettent une sédimentation rapide.

Les apports en sédiments fins dans la colonne d'eau et leur dépôt sur les marais et les vasières sont soumis à des variations importantes à l'échelle annuelle (Marion *et al*., 2007). Lors des suivis (Chapitre V), nous avons pu vérifier que les flux de sédiments à 35 cm du fond sont presque identiques quelque soit la station observée. La quantité de sédiment en transit en un point donné semble être déterminée principalement par l'hydropériode et n'est de plus pas clairement corrélée au dépôt observé. Cette constante disponibilité en sédiment permet une sédimentation continue selon un rythme semi-lunaire. Sur les marais salés le taux de sédimentation est relié au marnage et au niveau altimétrique. Les zones à spartine

fonctionnent cependant différemment car, bien qu'elles présentent une sédimentation nette positive, elles enregistrent des alternances sédimentation/érosion en relation avec le cycle végétatif de cette espèce.

Une synthèse des différents processus de sédimentation fine et des principaux forçages s'exerçant sur celle-ci est proposée en Figure 7.3.

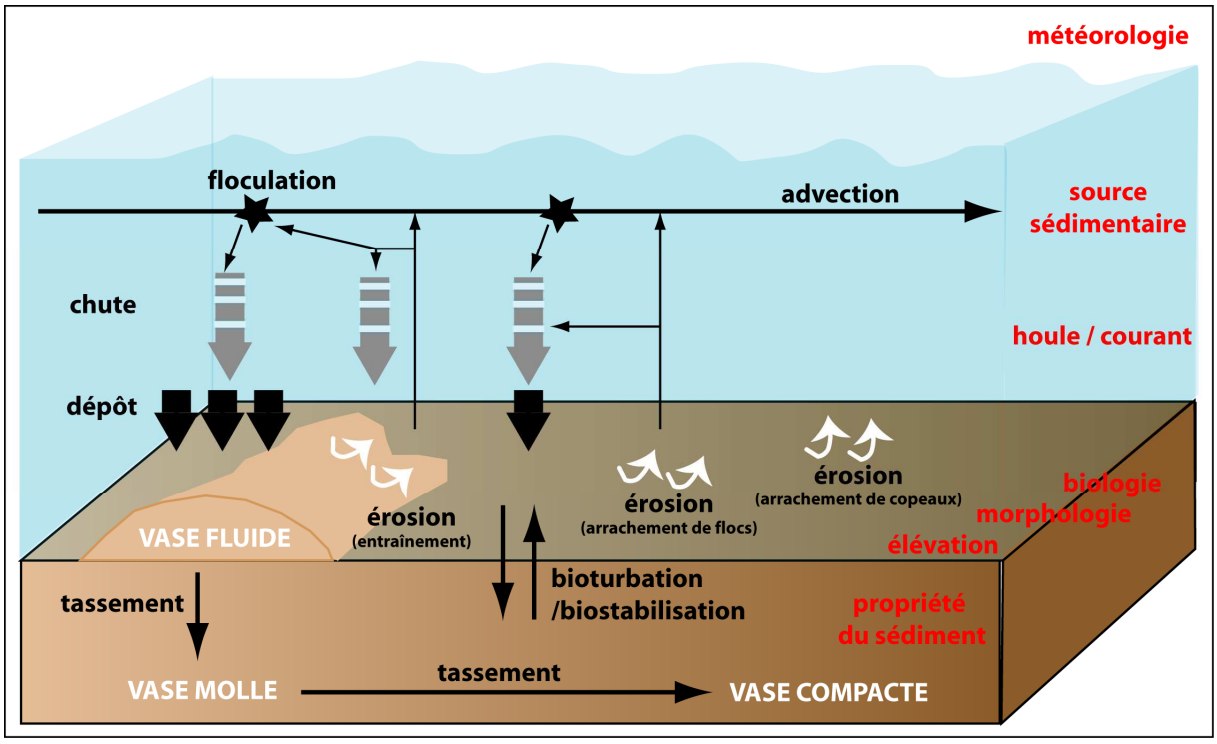


Figure 7.3. Schématisation des processus de sédimentation fine (en noir) et des principaux forçages (en rouge) en milieu estuarien (modifié de Lesourd, 2000).

Figure 7.3. *Schematic representation of fine sediment processes (in black) and main forcing (in red) in estuarine domain (modified from Lesourd, 2000).*

3. AJUSTEMENTS MORPHODYNAMIQUES ET COMBLEMENT

La juxtaposition des faciès dans l'espace est très importante pour l'identification des environnements qui se sont succédés dans le temps (Dalrymple et Choi, 2007). Les estuaires sont formés uniquement sous des conditions transgressives et sont donc représentés fondamentalement par des séquences transgressives (Dalrymple *et al.*, 1992 ; Boyd *et al.*, 2006; Dalrymple, 2006). L'analyse des dépôts successifs a permis d'identifier toute la gamme d'environnements sédimentaires qui composent classiquement un estuaire tempéré : dunes

éoliennes, estran sableux, slikke, schorre, chenaux de marée (Chapitre VI). Il s'agit d'environnements de transition typiques d'un milieu ouvert, semi-abrité puis abrité de l'influence directe des agents dynamique. Sur le plan granulométrique, cela se caractérise par des sédiments fins à très large dominance : argiles, silts et sable fin. La grande variabilité des faciès observés sur de faibles distances rend extrêmement difficile la reconstruction de coupes stratigraphiques projetées de type modélisation par stratigraphie séquentielle (Van Wagoner *et al*., 1990 ; Posamentier *et al*., 1992 ; Dalrymple et Choi, 2007).

En théorie, le remplissage progressif des plaines tidales entraîne une baisse progressive du volume oscillant ou prisme tidal (volume d'eau tidale qui entre et ressort d'un estuaire ou bassin tidal au cours d'un cycle de marée) car la progression de la sédimentation freine l'intensité et la pénétration de l'onde du flot (Van der Spek, 1990 ; Pethick, 1996) entraînant ainsi une baisse du marnage et une activité accrue du jusant qui est de plus en plus canalisé dans les chenaux de marée (Lessa, 1995 ; Masselink et Lessa, 1995 ; Lessa ; 2000). En réponse, les chenaux ont tendance à s'encaisser et à s'approfondir ce qui a être notamment observé lors de l'étude du réseau de chenaux de marée sur 50 ans dans le Chapitre VI. Ce chapitre a souligné par ailleurs l'importance de la sédimentation sur place des blocs érodés sur les versants des chenaux comme vecteur de colmatage de ceux-ci à travers l'interprétation des sondages réalisés sur les paleochenaux répérés dans les zones poldérisées. Les facteurs contrôlant la densité et la morphologie des chenaux de marée sont encore, à l'heure actuelle, mal connus et/ou incompris (Steel et Pye, 1997). Pethick (1992) suggère que la formation de ces réseaux de chenaux, plus qu'une simple fonction de drainage, est surtout issue d'un rééquilibrage morphologique dû à des flux tidaux de forte énergie. La chenalisation a, dans ce contexte, un rôle de dissipation de l'énergie des marées. Plusieurs études dans la littérature semblent montrer qu'à court terme, il existe un équilibre dynamique (érosion/sédimentation) entre les réseaux de chenaux dans les marais et les flux de marées (Bayliss-Smith *et al*, 1979 ; French et Stoddart, 1992 ; Allen, 2000a). Les suivis topographiques fins et étendus par le biais de campagnes LIDAR sur plusieurs années pourront être à même de supporter des bases de quantification plus fiables que les données issues de photographies aériennes (French, 2003).

Une synthèse à la manière de Dalrymple *et al.* (1992) est proposée en Figure 7.4. Elle rassemble la distribution des processus dynamiques, les unités morphologiques et stratigraphiques dans un modèle type Authie d'estuaires macro- à mégatidaux co-dominée houle-marée. Comme nous avons pu le mettre en évidence dans le Chapitre III, l'action de la

houle est très présente à l'embouchure mais est relayée très rapidement par celle de la marée dont la quasi-totalité de l'énergie du système dépend alors. On peut noter que l'influence marine domine largement l'estuaire, l'influence fluviale étant quant à elle très limitée.

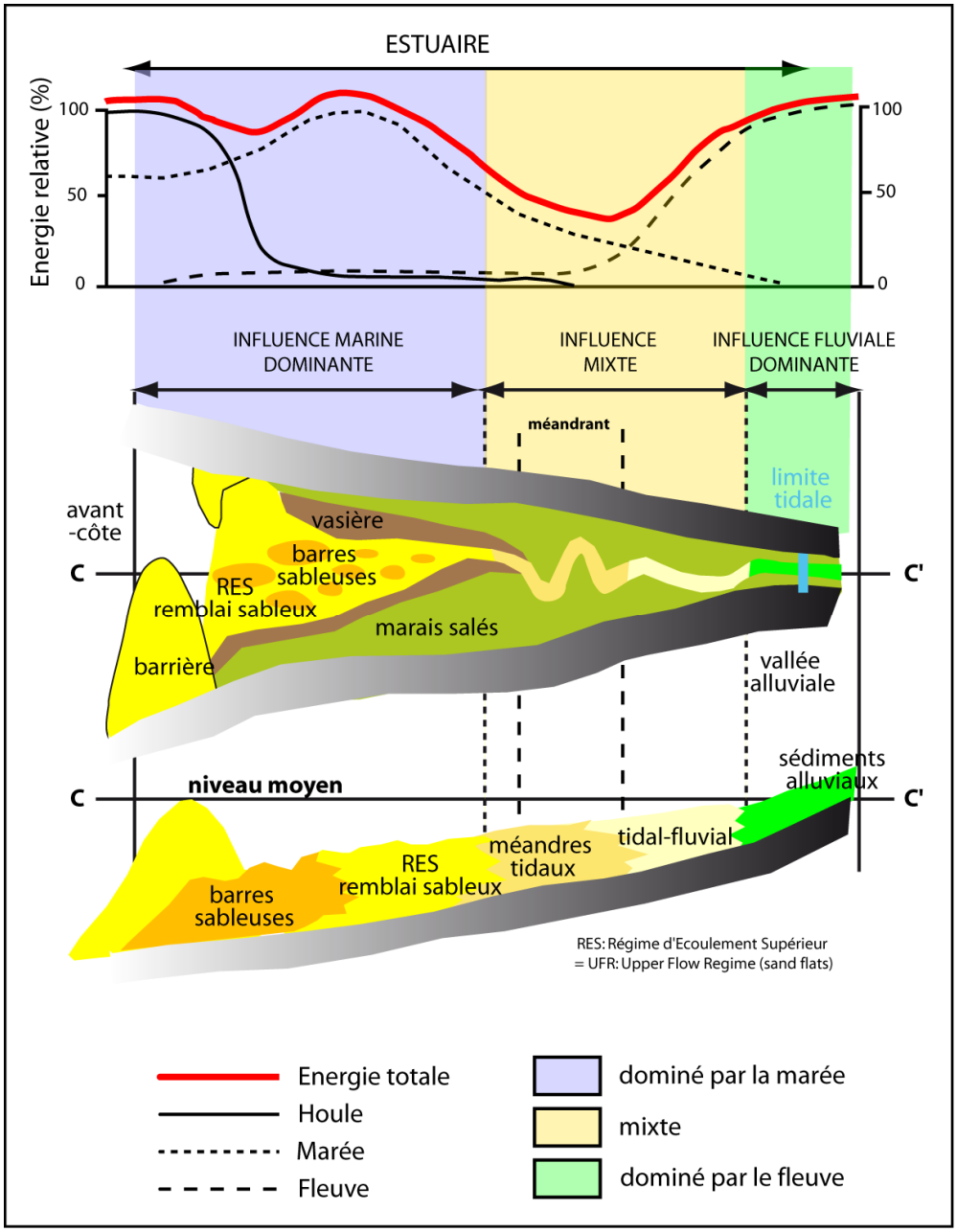


Figure 7.4. Modèle synthétique type Authie d'estuaires macro- à mégatidaux co-dominés par la houle et la marée, adapté des modèles morphodynamique de Dalrymple *et al.* (1992).

Figure 7.4. *Synthetic model of Authie-type macro- to megatidal estuaries co-dominated by waves and tides, adapted from the morphodynamic models of Dalrymple et al. (1992).*

La séquence stratigraphique met en évidence l'effet de la houle à l'embouchure mais stigmatise le rôle de la marée et de la dynamique des chenaux (Marion *et al.*, 2004) dans la

répartition et la succession des environnements sédimentaires, notamment de l'estuaire interne (Chapitre VI). L'action de la marée est enregistrée sous la forme de litages tidaux qui apparaissent à différentes profondeurs dans la séquence de remplissage. La dynamique tidale a de ce fait été prépondérante dans l'organisation des dépôts sur le laps de temps considéré et imposé par la résolution des sondages réalisés (correspondant à 400-500 ans environ si l'on reprend un taux de sédimentation moyen de 1 $cm.an^{-1}$). Ce signal tidal est plutôt bien préservé dans les parties sommitales de la séquence sous formes de rythmites tidales qui sont cependant localement altérées par la bioturbation.

Les paléochenaux étudiés ont apportés de clefs de compréhension des processus de comblement des chenaux (Trentesaux *et al.*, 2003) bien que la part naturelle et anthropique (remblai) de ce phénomène reste délicate à discerner. Les études hydrosédimentaires (Chapitre IV) ont quant à elles confirmé une bidirectionnalité des écoulements dans les chenaux mais surtout une possible dominance de l'intensité des courants de jusant. La sédimentation dans l'estuaire de l'Authie a impliqué sans doute des ajustements constants entre la montée du niveau marin, qui créait l'espace d'accommodation, les apports de sédiments qui remplissaient cet espace et le comportement de l'onde de marée, et par son biais, la morphologie et l'hydrodynamisme des chenaux de marée. Les principaux paramètres qui entrent en jeu dans ces ajustements sont les variations de l'onde tidale, la dynamique des chenaux de marée et le comportement structural des dépôts. Plus que la remontée relativement lente du niveau marin lors à la fin de l'Holocène (Denys et Baeteman, 1995 ; Baeteman 1999 ; Mrani-Alaoui, 2006), les différentes observations amènent à s'interroger sur le rôle qu'à pu jouer l'action anthropique dans le comblement estuarien à travers la poldérisation (Anthony et Dobroniak, 2000). En effet, la poldérisation a réduit assez brusquement l'espace soumis à la marée (espace d'accommodation) et ce sans variation notable du volume du prisme tidal. La même quantité de sédiments s'est déposée sur un espace moins important et a ainsi engendré une accrétion plus grande. Cette réponse morphologique a permis aux marais de progresser très rapidement en offrant des cotes altimétriques devenues plus propices à la colonisation par des végétaux halotolérants.

Bien que l'échelle de temps considérée et la complexité des faciès rencontrés soient plus importantes, la reconstruction des paléo-environnements de la plaine maritime flamande réalisée par Mrani-Alaoui (2006) fournit un équivalent intéressant pour évaluer le stade de

comblement de l'estuaire de l'Authie. Ses différentes phases de sédimentation terminale sont présentées en Figure 7.5.

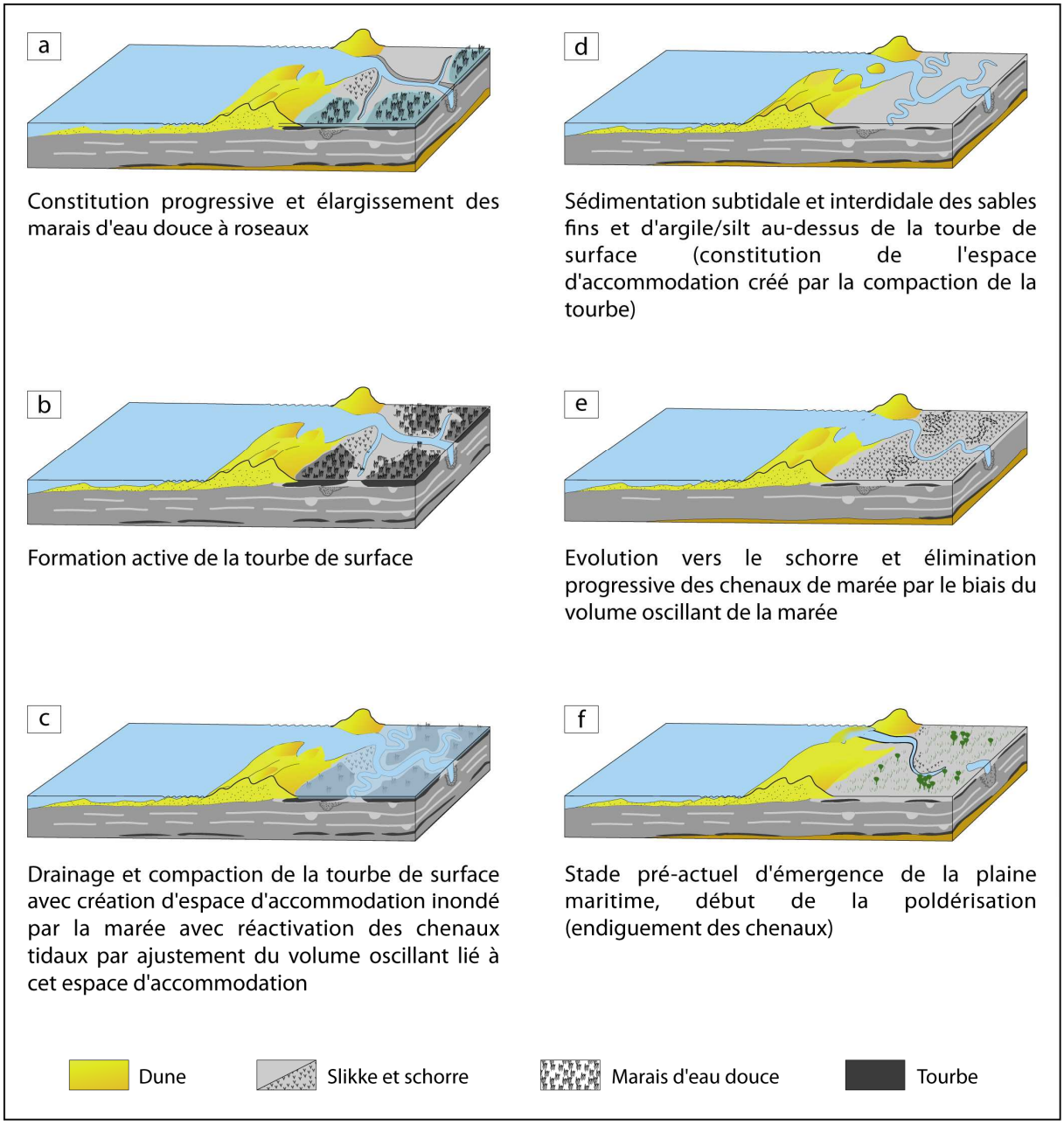


Figure 7.5. Blocs diagrammes schématisant les phases de sédimentation terminale de la plaine maritime flamande (Mrani-Alaoui, 2006).

Figure 7.5. *Simplified block diagrams representing terminal sedimentation stages of the Flemish maritime plain (Mrani-Alaoui, 2006).*

Dans la plaine maritime flamande, le comblement s'est fait par du sable marin amené par les tempêtes. A terme, cette évolution s'est faite au détriment des chenaux de marée, car la

sédimentation accrue et notamment l'encombrement des chenaux par du sable marin lié à l'asymétrie du flot a entraîné une nouvelle baisse du volume oscillant de la marée. Cette baisse a été accompagnée par le rétrécissement progressif et la fermeture des passes tidales qui alimentaient ces chenaux, à l'instar de la fermeture de plusieurs petits estuaires à fort comblement sableux du nord de la France au nord de l'estuaire de la Somme (Anthony, 2000 et 2002 ; Anthony *et al*., 2005). Cette fermeture s'est faite par les importants transits sableux littoraux qui ont également alimenté la construction d'un cordon continu de dunes éoliennes de Calais jusqu'à l'embouchure de l'Yser en Belgique.

L'estuaire de l'Authie se situe à une période clef de son évolution vers un milieu supratidal. En effet, la sédimentation fine y est devenue importante et on peut déjà observer à certains endroits la progression rapide d'espèces des hauts niveaux marins comme le scirpe maritime (*Scirpetum maritimi*) mais également de rudérales (cortège de graminées) ou d'espèces inféodées à des environnements d'eau douce tels les roseaux (*Arundo phragmites*) témoins de la diminution de l'influence marine.

4. IMPLICATIONS ECOLOGIQUES

Dans cette partie, nous avons choisi de discuter des interactions complexes entre la sédimentation fine et les biocénoses estuariennes. Il s'agit ici d'envisager les impacts écologiques que peut occasionner une sédimentation importante mais également le rôle que peut jouer le compartiment biologique envers la sédimentation. De plus, les organismes vivants peuvent affecter fortement le paysage estuarien en générant des conditions favorables ou non à l'érosion des sédiments. Deux zones estuariennes intéressantes de par leur productivité biologique et leur taux de sédimentation fine ont fait l'objet d'une investigation plus poussée : les estrans et les marais salés.

La diversité des estrans de l'estuaire a été abordée dans le Chapitre III. Nous nous intéresserons ici à ceux de l'estuaire moyen où une sédimentation fine est clairement présente : vasière et estran sablo-vaseux. L'évolution de la répartition du macrozoobenthos sur les surfaces intertidales en rive Nord de l'Authie a souligné deux phénomènes importants (Marion *et al.*, 2003 ; Tétu, 2004) : l'exhaussement rapide des estrans sur une échelle de temps courte et l'enrichissement en particules fines de ceux-ci. Cette évolution

n'est pas favorable à l'installation de stocks pérennes de coques (*Cerastoderme edule*) dont les recrutements restent importants. Elle n'entrave cependant pas à cette échelle les densités des espèces estuariennes comme *Scrobicularia plana, Macoma balthica* et *Hediste diversicolor* malgré des ajustements minimes dans leur distribution. L'Authie présente donc une faune estuarienne typique avec un spectre néanmoins restreint en raison de son comblement et de son évolution morphologique. Les apports massifs de matière organique liés principalement à la dégradation *in situ* de la végétation des marais salés ont pu également être évalués par l'installation d'espèces opportunistes (*Pygospio elegans*) qui forment périodiquement de grands aplats sous forme de buttes. Ces constats entraînent de lourdes interrogations sur la pérennité de la fonction écologique de ce système estuarien et, par voie de conséquence, sur la continuité des activités humaines qui en dépendent.

L'analyse de l'évolution des marais salés montre qu'il y a eu une progression générale de ceux-ci. Cependant si on compare les limites de leurs surface à des pas de temps plus courts, on peut mettre en évidence des régressions du schorre qui passent plutôt inaperçues lorsque l'on traite les surfaces de manière globale. Un schorre n'est donc pas fixé définitivement. Sur les marais salés, la canopée de la végétation joue un rôle essentiel en freinant l'écoulement des masses d'eau ce qui permet à la charge particulaire de se concentrer et de se déposer préférentiellement (Marion *et al.*, 2007). La spartine apparaît comme l'espèce la plus efficace dans cette fonction de piégeage. Cependant la période de sénescence de ses tiges rend a contrario les surfaces des marais salés vulnérables à l'érosion lors des périodes de forte énergie (Gray *et al.*, 1997). L'action de la spartine sur son environnement, par certains points comparable à celle de l'oyat en milieu dunaire, pourrait être envisagée comme un moyen d'éco-aménagement. En effet, l'aménagement du littoral s'est récemment concentré de façon considérable sur les méthodes dites douces (French, 2001). Dans ce cadre, la création et le maintien des marais salés a souvent été considérée comme importante tant d'un point de vue écologique que comme protection contre un risque d'inondation. Cependant ce débat resta longtemps spéculatif en raison du manque de données sur l'atténuation de la houle sur les marais du NW de l'Europe. Malgré tout, l'acquisition récente d'enregistrements permet d'attribuer raisonnablement de telles fonctions aux marais (Möller *et al.*, 2001 ; Möller, 2006). De plus, le développement de modèles numériques, et notamment la reconstitution de certains processus dans des modèles hydrodynamiques (French et Clifford, 2000 ; French, 2006 ; Le Hir *et al.*, 2007), permet d'améliorer les prédictions d'évolution de ces systèmes. L'utilisation de tels modèles bien que prometteuse n'a pas encore montré toutes ces

applications dans l'évaluation du potentiel de défense côtière par le biais de la maintenance ou de la restauration d'écosystèmes tels que les marais salés.

CONCLUSION

La large pluridisciplinarité des travaux présentée dans le cadre de cette thèse a été d'emblée un choix stratégique mais les différents résultats obtenus montrent l'intérêt de croiser différents "regards" scientifiques dans le but de mieux comprendre un système estuarien, complexe par essence. La méthodologie développée dans ce travail témoigne notamment de la volonté d'appréhender le comportement des particules fines tout en soulignant les interactions caractéristiques de notre site d'étude (mélanges sablo-vaseux, morphodynamique…) dans un souci de compréhension de la dynamique sédimentaire globale et ce à différentes échelles de temps.

La constitution d'une base de données importante concernant des paramètres clefs de la dynamique des sédiments fins et cohésifs pourra servir à des essais de modélisation dite de « bottom up » qui, avec l'aide d'équivalents comme la plaine maritime flamande, permettra d'envisager l'évolution future de la globalité du système et de tester différentes possibilités d'aménagements intégrés.

Les recherches sur l'estuaire de l'Authie sont susceptibles de déboucher sur un modèle d'estuaire à dominance hydrodynamique mixte marée-houle, plus approprié pour des estuaires macrotidaux tempéré situés dans des domaines à forte disponibilité en sables et répondant à ces critères hydrodynamiques (estuaires de la Manche). Les perturbations d'ordre climatiques et la variabilité naturelle qui s'amorcent dans le cadre du changement global s'accompagnent d'une pression humaine de plus en plus forte sur les espaces estuariens. Ces risques devront nous obliger à appréhender les écosystèmes estuariens de manière holistique en les replaçant au niveau régional de la Manche mais également dans le contexte mondial.

CONCLUSION

Les mécanismes contrôlant la dynamique des sédiments fins en milieu estuarien sont complexes du fait de la multiplicité des processus en action et de leur interactions diverses et encore souvent mal comprises. L'étude de la dynamique des sédiments fins regroupe quelques un des enjeux environnementaux fondamentaux. En raison de leur forte affinité avec une large gamme de contaminants métalliques et organiques, les particules fines sont en mesure de concentrer la pollution provenant à la fois du bassin versant et du milieu marin et dont les risques respectifs sont croissants (agriculture, trafic maritime…). Leur accrétion mène à la formation de vasières puis à l'édification de marais maritime, habitats d'importance communautaire au niveau européen. La pérennité de ces espaces ainsi que la biodiversité et la maintenance des ressources qu'ils contiennent sont cependant menacées par le comblement général des estuaires. Les travaux effectués lors de cette thèse ont permis de dégager quelques points clefs du fonctionnement d'un estuaire co-dominé par la houle et la marée en soulignant notamment les interactions entre les différents processus. Ils ont également permis d'appliquer un ensemble d'outils et de croiser les regards scientifiques par le biais d'une méthodologie transdisciplinaire.

Nous aborderons ici les principales conclusions tout en les replaçant dans le cadre des acquisitions réalisées. Tout d'abord, la mixité des masses d'eau a été mise en évidence par les études hydrologiques. Il apparaît que la salinité observée est très nettement corrélée au marnage de la marée considérée. Les études pondérales des MES (Matières en Suspensions) ont également révélé la présence d'une turbidité importante sur le fond. Les études hydrosédimentaires à l'échelle de la marée ont ensuite permis de caractériser la nature des matériaux composant cette turbidité, notamment par le biais des méthodes optiques discriminant les particules les plus fines. La précision des profils de concentration enregistrés nous a permis de quantifier cette ségrégation d'éléments fins sur la colonne d'eau et l'instrumentation laser a mis en évidence la taille des MES *in situ*, affirmant ainsi une dynamique importante liée à la présence de macroflocs.

Les mesures hydrodynamiques nous ont permis de confirmer l'influence restreinte de la houle uniquement au domaine d'embouchure, celle-ci se dissipant et se réfractant suffisamment pour avoir un impact nul en domaine estuarien interne. Ce constat permet de conclure que,

malgré les caractéristiques morphologiques évidentes d'une co-domination houle marée, notamment sur la partie nord de l'estuaire, le domaine interne est gouverné uniquement par la dynamique tidale. Cette dynamique est particulièrement bien enregistrée à travers les dépôts de sédiment observés et à leur rythmicité. La mise en évidence de l'asymétrie de la marée, à la fois verticale et horizontale, nous a permis de dégager le mécanisme de formation du maximum de turbidité. Cette pompe tidale semble être en mesure de redistribuer les sédiments très largement au sein de l'estuaire. Les études sédimentologiques couplées aux enregistrements courantométriques, nous ont permis d'envisager les tendances de transport résiduel. L'asymétrie en faveur du flot encourage un transport vers l'amont des sédiments par le biais du chenal principal. Cette asymétrie est cependant moins marquée sur les plus hauts niveaux où le jusant tend parfois à devenir dominant par son intensité. Cette accélération des vitesses de jusant est clairement visible lors des fortes amplitudes tidales (marées d'équinoxe) et se montre reliée au phénomène de vidange des hauts niveaux. Les interactions entre la morphologie et les asymétries de marées sont complexes et ne peuvent pas être déduites a priori. Cependant, à travers le transport résiduel engendré, ces aspects sont primordiaux dans la mesure où ils conditionnent l'évolution morphologique du système.

D'après le signal tidal très clair observé dans les dépôts récents et les premiers résultats de suivis altimétriques à haute résolution, impliquant notamment une périodicité semi-lunaire forte lors de l'accrétion, nous avons choisi de mettre en place des suivis des flux de sédiment dans l'estuaire et des apports sur la vasière et les marais salés sur cette échelle de temps. Nous avons pu alors quantifier ces flux mais également leur transfert entre les différents compartiments de l'espace estuarien. Ces suivis ont révélé le rôle clef des chenaux de marée comme vecteur du transport sédimentaire et de mettre en évidence une constante disponibilité des MES dans les masses d'eau. Les apports de sédiments sur les zones intertidales se font ensuite selon les niveaux altimétriques et la proximité des chenaux qui approvisionnent ces espaces. Les différents résultats ont mis en évidence l'importance que pouvait jouer la spartine dans les mécanismes de piégeage des sédiments (marais salés) mais également les répercussions que pouvaient avoir les forts taux de sédimentation sur les biocénoses benthiques à plus long terme.

Sur une échelle annuelle, nous avons pu envisager les variabilités saisonnières de cette accrétion, les conséquences en terme d'élévation de cette accumulation en soulignant le rôle de la compaction du profil sédimentaire. Les différentes datations ont permis de conclure également à la présence de différentes vitesses de sédimentation qui se sont succédées dans le temps. Le volet stratigraphique, prenant en compte les conclusions des études sur la plaine

maritime flamande, confirme le stade évolué de l'estuaire dans la progression de son comblement.

L'ensemble de ces travaux a permis l'élaboration d'une « boîte à outils » applicable aux espaces estuariens soumis à des agents énergétiques. La discussion des résultats et des apports relatifs des méthodes à la compréhension des processus en action est en mesure de permettre un choix argumenté de techniques appropriées dans le cadre de la mise en place d'études préalables à des plans de gestion intégrée. Les demandes de telles études sont croissantes sur ces espaces fragiles soumis à une pression anthropique et à des risques grandissants.

PERSPECTIVES

L'estuaire de l'Authie, considéré comme un site propre vis-à-vis des principales classes de polluants, a récemment suscité l'intérêt de nombreux chercheurs et a été choisi comme site d'étude dans le cadre de différents programmes sur les métaux (Billon *et al.*, 2001 ; 2002) ou sur l'écotoxicologie (Durou *et al.*, 2007a ; 2007b ; Durou et Mouneyrac, 2007 ; Gillet *et al.*, 2007). Les données acquises dans le cadre de cette thèse pourront notamment servir de base et/ou de complément (dynamique tidale, localisation des zones d'accrétion préférentielle, estimation des taux d'accumulation….) à de nombreuses études spécifiques. D'un point de vue scientifique, ces travaux soulèvent cependant quelques questions sur l'émergence d'un modèle conceptuel sur les estuaires mixtes. Il nous parait intéressant d'intégrer ces études sur l'Authie dans un premier temps à l'ensemble du système estuarien « picard » : le vaste estuaire de la Somme déjà soumis à la dépoldérisation et l'estuaire de la Canche, canalisé et de plus petite taille. Les échanges avec l'avant-côte devront être envisagés de façon plus précise à travers, par exemple, une étude plus large prenant en compte les trois prismes sédimentaires (*i.e.* Somme-Authie-Canche) simultanément.

La prédiction de la morphologie reste un projet ambitieux pour la recherche estuarienne (Uncles, 2002). Le niveau moyen de la mer devrait vraisemblablement s'élever rapidement pendant le 21ème siècle en raison du changement global qui s'est amorcé (Church et White, 2006). Il apparaît donc primordial d'appréhender la façon dont un estuaire et ses espaces intertidaux (dont les marais salés) vont y répondre. De récentes avancées dans l'étude

de la morphologie estuarienne ont dérivé de la modélisation mathématique et numérique après validation par les mesures intensives sur le court terme. Le développement de modèles numériques et analytiques ainsi que des logiciels techniques adaptés est essentiel pour autoriser l'interprétation de grandes banques de données et l'assistance nécessaire vers la compréhension de processus complexes. De la même façon, les progrès réalisés dans l'instrumentation permettent des acquisitions plus pointues sur le terrain, notamment en ce qui concerne les caractéristiques des sédiments fins (taille des flocs, mécanismes d'agrégation, vitesse de chute) qui sont à même de fournir une meilleure paramétrisation aux modèles de transport.

Cependant, il apparaît clairement que les paramétrisations utilisées dans les modules de transport sédimentaires de ces modèles, comme le seuil d'érosion (*e.g.* McAnally et Mehta, 2001; Mehta, 1993) ne sont pas simplement physiquement dépendantes. Les processus physiques sont en effet influencés d'une manière plus ou moins importante par les interactions avec le compartiment biologique. Les futures recherches devront impérativement incorporer ces effets biologiques dans les études de transport sédimentaire. Les aspects de suivi sur des échelles plus longues et de manière continue apparaissent encore plus nécessaires dans ce cadre afin de prendre en compte les variabilités saisonnières et inter-annuelles. Le développement d'études interdisciplinaires semble être une voie à privilégier pour la progression des connaissances fondamentales.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

■

AERNOUTS D., 2005. *Le rôle des changements bathymétriques à l'avant-côte sur l'évolution des littoraux meubles du Cap Gris Nez à Dunkerque, Côte d'Opale, Nord de la France*. Thèse de Doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale.

AGRAWAL Y.C. et H.C. POTTSMITH, 2000. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. *Marine Geology* **168**: 89-114.

ALLEN G.P., SALOMON J.C., BASSOULET P., DU PENHOAT Y. et C. DE GRANDPRE, 1980. Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sedimentary Geology* **26**: 69-90.

ALLEN J. R. L., 2000a. Late Flandrian (Holocene) tidal paleochannels, Gwent Levels (Severn Estuary), SW Britain: character, evolution and relation to shore. *Marine Geology* **162**: 353-380.

ALLEN J.R.L., 2000b. Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary science Reviews* **19**: 1155-1231.

ALMEIDA M. , MUCHA A.P. et M.T. VASCONCELOS, 2005. The role of a salt marsh plant on trace metal bioavailability in sediments: estimation by different chemical approaches. *Environmental Science and Pollution Research* **12** (5) 271-277.

AMINOT A. et M. CHAUSSEPIED, 1983. Manuel des analyses chimiques en milieu marin. CNEXO.

ANTHONY E. J., 2000. Marine sand supply and Holocene coastal sedimentation in northern France between the Seine estuary and Belgium. *In:* PYE, K. et J.R.L. ALLEN (Eds.), *Sedimentology, Geomorphology and Geoarchaeology, Coastal and Estuarine Environments*, Special Publications of the Geological Society of London **175**: 87-97.

ANTHONY E.J., 2002. Long-term marine bedload segregation, and sandy versus gravelly Holocene shorelines in the eastern English Channel. *Marine Geology* **187**: 221-234.

ANTHONY E.J., 2005. Wave- and tide-dominated coasts. *In:* SCHWARZ M.L. (Ed.), *Encyclopedia of Coastal Science*, Springer, Dordrecht: 1046-1049.

ANTHONY E.J. et C. DOBRONIAK, 2000. Erosion and recycling of estuary-mouth dunes in a rapidly infilling macrotidal estuary, the Authie, Picardy, northern France. *In:* PYE, K. et J.R.L. ALLEN (Eds.), *Coastal and Estuarine Environments - Sedimentology, Geomorphology and Geoarchaeology*, Special Publications of the Geological Society of London **175**: 109-121.

ANTHONY E.J. et F. DOLIQUE, 2001. Natural and human influences on the contemporary evolution of gravel shorelines between the Seine estuary and Belgium. *In:* Packham J. et A. Neal (Eds.), *The ecology and Geomorphology of Coastal Shingle*, Westbury Academic and Scientific Publishers: 132-148.

ANTHONY E.J. et A. HEQUETTE, 2007. The grain-size characterisation of coastal sand from the Somme estuary to Belgium: Sediment sorting processes and mixing in a tide- and storm-dominated setting. *Sedimentary Geology. IN PRESS*

ANTHONY E.J., LEVOY F. et O. MONFORT O., 2004. Morphodynamics of intertidal bars on a megatidal beach, Merlimont, Northern France. *Marine Geology* **208**: 73-100.

ANTHONY E.J., LEVOY F., MONFORT O. et C. DEGRYSE-KULIKARNI, 2005a. Short-term intertidal bar mobility on a ridge and runnel beach, Merlimont, Northern France. *Earth Surface Processes and Landforms* **30** (1): 81-93.

ANTHONY E.J., MARION C., BASTIDE J., DOBRONIAK C., DOLIQUE F. et A. TRENTESAUX, 2005b. Rapid 'forced' sandy accretion of small macrotidal estuaries in northern France: the Somme, Authie and Canche estuaries. Conference INQUA/IGCP 495 "*Late Quaternary Coastal Changes Sea Level, Sedimentary Forcing and Anthropogenic Impacts"*, June 28th-July 2d 2005, Dunkerque, FRANCE.

ANTHONY E.J et J. Orford, 2002. Between wave- and tide-dominated coasts: the middle ground revisited. *Journal of Coastal Research* SI **36**: 8-15.

AUBREY D.G., 1986. Hydrodynamic controls on sediment transport in well-mixed bays and estuaries. *In:* VAN dE KREEKE J. (Ed.), *Physics of shallow estuaries and bays*. Springer-Verlag, New York.

AUGRIS C., CLABAUT P. et B. TESSIER, 1995. *Le domaine marin côtier du Nord Pas-de-Calais : Carte des formations superficielles au 1:100 000*. IFREMER/Région Nord Pas-de-Calais/Université de Lille I.

■

BAETEMAN C., 1999. The Holocene depositional history of the IJzer palaeovalley (western Belgian coastal plain) with reference to the factors controlling the formation of the intercalated peat beds. *Geologica Belgica* **2** (3-4): 39-72.

BAETEMAN C., 2004. The Holocene development of a tide-dominated coastal lowland. Western coastal plain of Belgium. Field Guide. *The QRA Third International Postgraduate Symposium Fieldtrip*, September 17th 2004. Belgian Geological Survey, Brussels, Belgium.

BAETEMAN C., SCOTT D. B. et M. VAN STRYDONCK, 2002. Changes in coastal zone processes at a high sea-level stand: a late Holocene example from Belgium. *Journal of Quaternary Science* **17** (5–6): 547–559.

BALOUIN Y., 1998. *Enregistrement sédimentaire de la dynamique tidale dans une vasière intertidale de l'estuaire de la Gironde*. Mémoire de DEA, Université de Bordeaux.

BANO M., 2000. *Imagerie de la proche surface par géoradar*. Habilitation à Diriger des Recherches, Spécialité Géophysique Appliquée, Université Louis Pasteur - Strasbourg I.

BARTHOLDY J., CHRISTIANSEN C. et H. KUNZENDORF, 2004. Long term variations in backbarrier saltmrsh deposition on the Skallingen peninsula – the Danish Wadden Sea. *Marine Geology* **203**: 1-21.

BECK C., CLABAUT P., DEWEZ S., VICAIRE O., CHAMLEY H., AUGRIS C., HOSLIN R. et A. CAILLOT, 1991. Sand bodies and sand transport paths at the English Channel-North Sea border: morphology, dynamics and radioactive tracing. *Oceanologica Acta* **11**: 111-121.

BEETS D. J., VAN DER VALK L. et M. J. F. STIVE, 1992. Holocene evolution of the coast of Holland. *Marine Geology* **103**: 423–443.

BEGHIN V., 1999. *Etude de la matière organique et du réseau trophique en estuaire de la Seine : Utilisation des marqueurs biochimiques (acides gras et stérols).* Thèse de Doctorat de 3ème Cycle, Université des Sciences et Technologies de Lille.

BENTLEY D. et J. ORANGE, 1984. *Etude intégrée du littoral : Estuaires (Aa-Canche-Authie-Somme), Hydrobiologie*. Rapport du contrat EPR/USTL N°147.

BILLON G., 2001. *Géochimie des métaux et du soufre dans les sédiments des estuaires de la Seine et de l'Authie*. Thèse de Doctorat de 3ème Cycle, Université des Sciences et Technologies de Lille.

BILLON G., OUDDANE B. et A. BOUGHRIET, 2001. Chemical speciation of sulfur compounds in surface sediments from three bays (Fresnaye, Seine and Authie) in northern France, and identification of some factors controlling their generation. *Talanta* **53** (5): 971-981.

BILLON G., OUDDANE B., P. RECOURT et A. BOUGHRIET, 2002. Depth Variability and some Geochemical Characteristics of Fe, Mn, Ca, Mg, Sr, S, P, Cd and Zn in Anoxic Sediments from Authie Bay (Northern France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **55** (2): 167-181.

BIRD E., 2000. *Coastal Geomorphology, An Introduction*. John Wiley and Sons.

BLACKFORD J., 2000. Palaeoclimatic records from peat bogs. *Tree* **15**: 193-198.

BOGGS S., 1987. *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. Merrill.

BOKUNIEWICZ H., 1995. Sedimentary systems of coastal-plains estuaries. *In:* PERILLO G.M.E. (Ed.), *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries, Developments in Sedimentology* **53**, Elsevier: 49-65.

BONNEFILLE R. et H. ALLEN, 1967. *Etude de la baie d'Authie et des moyens de défense contre la mer*. Rapport LNH de Chatou/EDF.

BOON J.D. et R.J. BYRNE, 1981. On basin hypsometry and the morphodynamic response of coastal inlet systems. *Marine Geology* **40**: 27-48.

BOUMANS R. et J.W. DAY Jr. 1993. High precision measurements of sediment elevation in shallow coastal areas using a sedimentation-erosion table. *Estuaries* **16**: 375-380.

BOUST D., 1999. Distribution and inventories of some artificial and naturally-occurring radionuclides in medium to coarse-grained sediments of the channel. *Continental Shelf Continental* **19**: 1959-1975.

BREW D. S., HOLT T., PYE K. et R. NEWSHAM, 2000. Holocene sedimentary evolution and palaeocoastlines of the Fenland embayment, eastern England. *In:* SHENNAN I. et J.

ANDREWS (Eds.), *Holocene land–ocean interaction and environmental change around the North Sea*. Geological Society of London, Special Publications **166**: 253-273.

BRIQUET A., 1930. *Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique*. Thèse de doctorat ès sciences, Université d'Orléans.

BROWN S.L., 1998. Sedimentation on Humber saltmarsh. *Sedimentary Process in the intertidal Zone, Geological Special Publication* **139**: 69-84.

BUNT J.A.C., LARCOMBE P. et C.F. JAGO, 1999. Quantifying the response of optical backscatter devices and transmissometers to variations in suspended particulate matter. *Continental Shelf Research* **19**: 1199-1220.

●

CAHOON D.R., REED D.J. et J.W. DAY Jr. 1995. Estimating shallow subsidence in microtidal salt marshes of the southeastern United States: Kaye and Barghoorn revisited. *Marine Geology* **128**: 1-9.

CAHOON D.R. et LYNCH J.C., 1997. Vertical accretion and shallow subsidence in a mangrove forest of southwestern Florida. *Mangroves and Salt Marshes* **1**: 173-186.

CAHOON, D.R., LYNCH J.C., HENSEL P., BOUMANS R., PEREZ B.C., SEGURA B. et J. W. DAY Jr, 2002a. A device for high precision measurement of wetland sediment elevation: I. Recent improvements to the sedimentation-erosion table. J*ournal of Sedimentary Research* **72** (5): 730-733.

CAHOON D. R., LYNCH J.C. et R.M. KNAUS, 1996. Improved cryogenic coring device for sampling wetland soils. *Journal of Sedimentary Research* **66**: 1025-1027.

CAHOON D.R., LYNCH J. C., PEREZ B.C., SEGURA B., HOLLAND R.D., STELLY C., STEPHENSON G. et P. HENSEL, 2002b. High-precision measurements of wetland sediment elevation: II. The Rod Surface Elevation Table. *Journal of Sedimentary Research* **72** (5): 734-739.

CAHOON D.R., MARIN P.E., BLACK B.K. et J.C. LYNCH, 2000. A method for measuring vertical accretion, elevation, and compaction of soft, shallow-water sediments. *Journal of Sedimentary Research*. **70** (5): 1250-1253.

CAMERON W.M. et D.W. PRITCHARD, 1963. Estuaries. *In: The sea, volume 2* (Ed. M.N. HILL), Wiley Intersciences: 306-324.

CARTER R.W.G., 1988. *Coastal Environments* Academic Press, London.

CAUCHETEUX M., 2000. *Le modèle de Gao et Collins (1991, 1992) appliqué à la flèche sableuse de l'estuaire de l'Authie*. Mémoire de Maîtrise, Université des Sciences et Technologies de Lille.

CHAMLEY H., 2000 (2de édition). *Bases de sédimentologie*. Dunod.

CHARMAN R., 2004. The use of shore-based sediment traps (Booner tubes) in estuarine waters: an example from the Ouse estuary, east Sussex, UK. *Proceedings International Workshop HWK- From Particle Size to Sediment Dynamics*, Delmenhorst 15-18 April 2004, Book of abstract: 36-38.

CHAVEROT S., 2006. *Impact des variations récentes des conditions météo-marines sur les littoraux meubles du Nord-Pas-de-Calais*. Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale.

CHEVALIER A., 1923. Note sur les *Spartina* de la flore française. *Bulletin de la Société Botanique Française* **70**: 54-63.

CHMURA G.L., COFFEY A. et R. CRAGO, 2001. Variation in surface sediment deposition on salt marshes in the Bay of Fundy. *Journal of Coastal Research* **19**: 221-227.

CHURCH J.A. et N.J. WHITE, 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters* **33**.

CLIQUE P.M., 1986. *Catalogue sédimentologique des côtes de France. Côtes de la mer du Nord et de la Manche, Partie A : de la frontière belge à la baie de Somme*. Etudes et recherches d'Electricité de France. L.N.H.-C.H.F.

COJAN I. et M. RENARD, 1999. *Sédimentologie.* Dunod.

COLBEAUX J.-P., 1974. Mise en évidence dd'une zone de cisaillement Nord-Artois. *Compte-Rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, D, **278** : 1159-1161.

COLBEAUX J.-P., BEUGNIES A., DUPUIS C., ROBASZINSKI F. ET J. SOMME, 1977. Tectonique de blocs dans le Sud de la Belgique et le Nord de la France. Annales de la Société Géologique du Nord. XCVII : 191-222.

COOPER J.A.G., 1993. Sedimentation in a river dominated estuary. *Sedimentology* **40**: 979-1017.

CORILLION R., 1936. *Spartina townsendii* Groves. *Le monde des plantes* **219**: 21.

COTTET M., DE MONTAUDOUIN X., BLANCHET H. et P. LEBLEU**,** 2007. *Spartina anglica* eradication experiment and *in situ* monitoring assess structuring strength of habitat complexity on marine macrofauna at high tidal level. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **71** (3-4): 629-640.

COURP T. et A. MONACO, 1990. Sediment dispersal and accumulation on the continental margin of the Gulf of Lions: sedimentary budget. *Continental Shelf Research* **10** (9–11): 1063– 1087.

COWELL P.J. et B.G. THOM, 1994. Morphodynamics of coastal evolution. *In:* CARTER R.W.G. et C.D. WOODROFFE (Eds.), *Coastal evolution*, Cambridge University Press: 33-86.

CUNDY A.B., CROUDACE I.W., WARWICK P.E., OH J.-S. et S.K. HASLETT, 2002. Accumulation of COGEMA-La Hague-derived reprocessing wastes in French salt marsh sediments. *Environmental Science and Technology* **36** (23): 4990-4997.

CUNDY A.B. et I.W. CROUDACE, 1995. Sedimentary and geochemical variations in a salt marsh mudflat environment from the mesotidal Hamble estuary, southern England. *Marine Chemistry* **51**: 115-132.

CUNDY A.B., HOPKINSON L., LAFITE R., SPENCER K., TAYLOR J.A., OUDDANE B., HEPPELL C.M., CAREY P.J., CHARMAN R., SHELL D. et S. ULLYOTT, 2005. Heavy metal distribution and accumulation in two Spartina sp.-dominated macrotidal salt marshes from the Seine estuary (France) and the Medway estuary (UK). *Applied Geochemistry* **20** (6): 1195-1208.

CUROY J., 2002. *Etude du comblement récent d'un estuaire macrotidal : l'Authie. Etude de carottes sédimentaires*. Mémoire de DEA, Université des Sciences et Technologies de Lille.

CURRY D., 1989. The rock floor of the English Channel and its significance for the interpretation of marine unconformities. *Proceedings of the Geological Association, London* **100**: 339-352.

DALRYMPLE R.W., 1992. Tidal depositional Systems. *In:* WALKER R.G. et N.P. JAMES (Eds.), *Facies models-response to sea level change*, Geological association of Canada: 195-217.

DALRYMPLE R.W. et K. CHOI, 2007. Morphologic and facies trends through the fluvial–marine transition in tide-dominated depositional systems: A schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation. *Earth-Science Reviews* **81**: 135-174.

DALRYMPLE R.W., ZAITLIN B.A. et R. BOYD, 1992. A conceptual model of estuarine sedimentation. *Journal of Sedimentology and Petrography* **62**: 1130-1146.

DAVIDSON-ARNOTT R.G.D., VAN PROOSDIJ D., OLLERHEAD J. et L. SCHOSTAK, 2002. Hydrodynamics and sedimentation in salt marshes: examples from a macrotidal marsh, Bay of Fundy. *Geomorphology* **48**: 209-231.

DAVIES J.H., 1964. A morphogenetic approach to world shorelines. *Z. Geomorphol.* **8**: 127-142.

DAY, J.W. Jr., A. RISMONDO, F. SCARTON, D. ARE, and G. CECCONI. 1998a. Relative sea level rise and Venice lagoon wetlands. *Journal of Coastal Conservation* **4**: 27-34.

DAY, J.W. Jr., F. SCARTON, A. RISMONDO, and D. ARE. 1998b. Rapid deterioration of a salt marsh in Venice Lagoon, Italy. *Journal of Coastal Research* **14** (2): 583-590.

DEBOUDT P., 1997. *Etude de géomorphologie historique des littoraux dunaires du Pas-de-Calis et du Nord Est de la France.* Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.

DELOFFRE J., 2005. *La sédimentation fine sur les vasières intertidales en estuaires macrotidaux : Processus, quantification et modélisation de l'échelle semi-diurne à l'échelle annuelle*. Thèse de Doctorat, Université de Rouen.

DELOFFRE J., VERNEY R., LAFITE R., LESUEUR P. , LESOURD S. et A.B. CUNDY, 2007. **S**edimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries: Sedimentation rhythms and their preservation. *Marine Geology* **241** (1-4): 19-32.

DENÈGRE J. et F. SALGÉ, 1996. *Les systèmes d'information géographique*. Presses universitaires de France, Paris.

DE WIT P.J. et C. KRANENBURG, 1996. On the effect of a liquefied mud bed on waves and flow characteristics. *Journal of Hydraulic Research* **34**: 3-18.

DE WIT P.J. et C. KRANENBURG, 1997. The wave-induced liquefaction of cohesive sediment beds. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **45** (2): 261-271.

DIGNE J., 2004. *Traceurs géochimiques en baie d'Authie*. Mémoire de BTS, Université des Sciences et Technologies de Lille.

DIONNE J.C., 1963. Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. *Z. Geomorph.* **7**: 36-44.

DOBRONIAK C., 2000. *Géomorphologie, hydrodynamique et écologie d'un estuaire tempéré macrotidal : l'Authie, Manche Orientale, France*. Thèse de Doctorat, Université du Littoral-Côte d'Opale.

DOBRONIAK C. et E. J. ANTHONY, 2002. Short-term morphological expression of dune sand recycling on a macrotidal, wave-exposed estuarine shoreline. *Journal of Coastal Research* SI **36**: 240-248.

DRONKERS J., 1985. Tide-induced residual transport of fine sediment. *In:* VAN DE KREEKE J. (Ed.), *Physics of Shallow Estuaries and Bays*. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, Vol. 16, Springer: 228–244.

DRONKERS J., 1986. Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research* **20** (2-3): 117-131.

DRONKERS J., 1998. Morphodynamics of the Dutch delta. *In:* DRONKERS J. et M. SCHEFFERS (Eds.), *Physics of estuaries and coastal seas*. Rotterdam, Balkema: 297-304.

DUCHAUFOUR P., 1997 (5ème édition). *Abrégé de Pédologie*. Masson.

DUPONT J.-P., 2001. *Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension.* Programme Scientifique Seine Aval.

DURAND P., 1998. Cinématique d'un littoral sableux à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Exemple du littoral d'Argelès-Plage à Saint-Cyprien (Roussillon, France). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement* **2**: 155-166.

DUROU C. et C. MOUNEYRAC, 2007.Linking steroid hormone levels to sexual maturity index and energy reserves in *Nereis diversicolor* from clean and polluted estuaries. *General and Comparative Endocrinology* **50** (1): 106-113.

DUROU C., POIRIER L., AMIARD J.-C., BUDZINSKI H., GNASSIA-BARELLI M., LEMENACH K., PELUHET L., MOUNEYRAC C., ROMÉO M. et C. AMIARD-TRIQUET, 2007a. Biomonitoring in a clean and a multi-contaminated estuary based on biomarkers and chemical analyses in the endobenthic worm *Nereis diversicolor*. *Environmental Pollution* **148** (2): 445-458.

DUROU C., SMITH B.D., ROMÉO M., RAINBOW P.S., MOUNEYRAC C., MOULOUD M., GNASSIA-BARELLI M., GILLET P., DEUTCH B. et C. AMIARD-TRIQUET, 2007b. From biomarkers to population responses in *Nereis diversicolor*: Assessment of stress in estuarine ecosystems. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **66** (3): 402-411.

DUTRY B., 2001. *Variabilités spatio-temporelles du site de la « grande Dune » en rive nord de l'estuaire de l'Authie et impacts sur les terres arrières littorales*. Maîtrise de Géographie Physique, Université du Littoral Côte d'Opale.

DYER K.R., 1995. Sediment transport processes in estuaries. *In:* PERILLO G.M.E (Ed.), *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*, *Delopments in Sedimentology* **53**, Elsevier: 423-447.

DYER K.R., 1997 (2ème édition). *Estuaries: a physical introduction*. Wiley.

DYER K.R., CHRISTIE M.C. et WRIGHT E.W., 2000. The classification of intertidal mudflats. *Continental Shelf Research* **20**: 1039-1060.

DYER K.R. et A.J. MANNING, 1999. Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimension. *Journal of Sea Research* **41**: 87-95.

∧

EHRHOLD A. et AUFFRET J.P., 1996. Approche bi-dimensionnelle des transports sédimentaires à partir des variations granulométriques des sédiments superficiels : Exemple de la partie Occidentale de la baie du Mont Saint-Michel. *Génie civil, Génie côtier*. IVèmes Journées Nationales, 17 au 19 avril 1996, Ecole pratique des hautes études, Université du Havre, Dinard.

EHRHOLD A., 1999. *Dynamique de comblement d'un bassin sédimentaire soumis à un régime mégatidal : exemple de la baie du Mont Saint Michel*. Thèse de Doctorat, Université de Caen.

EISMA D., 1993. *Suspended matter in the aquatic environment*. Springer-Verlag.

FAIRBRIDGE R.W., 1980. The estuary: its definition and geodynamic cycle. *In:* OLAUSSON E. et I. CATO (Eds.), *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries*, Wiley: 1-35.

FISCHER H.B., 1972. Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries. *Journal of Fluid Mechanic* **53**: 672-687.

FRENCH J.R., 1993. Numerical-Simulation of Vertical Marsh Growth and Adjustment to Accelerated Sea-Level Rise, North Norfolk, Uk. *Earth Surface Processes and Landforms* **18** (1): 63-81.

FRENCH J.R., 2003. Airborne LIDAR in support of geomorphological and hydraulic modeling. *Earth Surface Processes and Landforms* **28**: 321-335.

FRENCH J.R., 2006. Tidal marsh sedimentation and resilience to environmental change: Explorating modeling of tidal, sea-level and sediment supply forcing in predominantly allochtonous systems. *Marine Geology* **235** (1-4): 119-136.

FRENCH J.R. et N.J. Clifford, 2000. Hydrodynamic modelling as a basis for explaining estuarine environments dynamics: some computational and methodological issues. *Hydrological Processes* **14**: 2089-2108.

FRENCH J.R. et D.R. STODDART, 1992. Hydrodynamics of salt marsh creek systems: Implications for marsh morphological development and material exchange. *Earth Surface Processes and Landforms* **17**: 235-252.

FRENCH P.W., 1997. *Coastal and estuarine management*. Routledge, London.

FRENCH P.W., 2001. *Coastal defences. Processes, Problems and Solutions*. Routledge, London.

FRIEDRICHS C.T. et D.G. AUBREY, 1988. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Estuarine and Coastal Shelf Science* **27**: 521-545.

FRIEDRICHS C.T., LYNCH D.R. et D.G. AUBREY, 1992. Velocity asymmetries in frictionally dominated tidal embayments: longitudinal and lateral variability. *In:* PRANDLE D. (Ed.), *Dynamics and Exchanges in Estuaries and the Coastal Zone*. AGU, Washington, DC : 277-312.

GABELLE C., 2002. *Origine et transport de la matière organique particulaire dans l'estuaire de l'Authie ; Utilisation des marqueurs biogéochimiques (acides gras et stérols).* DEA Structure et Dynamique des Systèmes Réactifs, Université des Sciences et Technologies de Lille.

GALLOWAY W.E., 1975. Process framework for describing the morphologic and the stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. *In:* BROUSSARD M.L. (Ed.), *Deltas - Models for Exploration*, Houston Geol. Soc.: 87-98.

GAO S., 1996. A Fortran program for grain-size analysis to define net sediment transport pathways. *Computers and Geosciences* **22**(4): 449-452.

GAO S. et M. COLLINS, 1991. A critique of the "McLaren method" for defining sediment transport paths. *Journal of Sedimentary Petrology* **61**: 143-146.

GAO S. et M. COLLINS, 1992. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". *Sedimentary Geology* **80**: 47-60.

GAO S. et M. COLLINS, 1994a. Analysis of grain-size trends for defining sediment transport pathways in marine environment. *Journal of Coastal Research* **10** (1): 70-78.

GAO, S. et M. COLLINS, 1994b. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"-reply. *Sedimentary Geology* **90**: 157-159.

GEYER W.R., MORRIS J.T., PRAHL F.G. et D.A. JAY, 2000. Interaction between physical processes and ecosystem structure: a comparative approach. *In:* HOBBIE J.E. (Ed.), *Estuarine science : a synthetic approach to research and practice*, Island Press: 177-210.

GEMEL, 1999. *Evolution sédimentaire de l'Authie (1994-199)*. Rapport Conseil Général de la Somme.

GERARD B., 1999. *Le littoral, problèmes et pratiques de l'aménagement*. Editions BRGM, Manuels et méthodes **32**.

GILLET P., MOULOUD M., DUROU C. et B. DEUTSCH, 2007. Response of *Nereis diversicolor* population (Polychaeta, Nereididae) to the pollution impact – Authie and Seine estuaries (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. IN PRESS

GILPIN M.B., 2003. *A snapshot of suspended sediment concentrations and fluxes using optical and acoustic velocity profilers, the Stour Estuary, Suffolk, UK*. Report ARGUS Gesellschaft fuer Umweltmesstechnik MBH.

GRAY A.J., RAYBOULD A.F. et S.L. BROWN, 1997. The environmental impact of *Spartina anglica*: past, present and predicted. *In:* PATTEN K. (Ed.), *Second International Spartina Conference*. Washington State University, Cooperative Extension, Olympia WA: 34-40.

GROCHOWSKI N.T.L., COLLINS M.B., BOXALL S.R. et J.C. SALOMON, 1993a. Sediment transport predictions for the English Channel, using numerical models. *Journal of the Geological Society* **150**: 683-695.

GROCHOWSKI N.T.L., COLLINS M.B., BOXALL S.R., SALOMON J.C., BRETON M. et R. LAFITE, 1993b. Sediment transport pathways in the eastern English Channel. *Oceanologica Acta* **16**: 531-537.

GROEN P., 1967. On the residual transport of suspended matter by an alternating tidal current. *Netherlands Journal of Sea Research* **3-4**: 564–574.

GSSI, 1998. *Operations manual for the GEM-300 multifrequency electromagnetic profiler*. Geophysical Survey Systems Inc., North Salem, NH.

GUILCHER A., 1979 (2de édition). *Précis d'hydrologie marine et continentale*. Masson.

■

HAMBLIN R.J.O., CROSBY A., BALSON P.S., JONES S.M., CHADWICK R.A., PENN I.E. et M.J. ARTHUR, 1992. *The geology of the English Channel.* British Geological Survey.

HANSEN D.V. et RATTRAY M.Jr, 1966. New dimensions in estuary classification. *Limnol. Oceanogr.* **11**: 319-326.

HASLETT S.K., CUNDY A.B., DAVIES C.F.C., POWELL E.S. et I.W. CROUDACE, 2003. Salt marsh sedimentation over the Past c. 120 years along the West Cotentin coast of Normandy (France): relationship to sea-level rise and sediment supply. *Journal of Coastal Research* **19** (3): 609-620.

HAYARD P.J., WIGHAM G.D. et N. YONOW, 1995. Chapter 10: Molluscs. *In:* HAYWARD P.J. et J.S. RYLAND *(*Eds.), *Handbook of the marine fauna of North East Europe*. Oxford University Press: 484-628.

HAYTER E.J. et A.J. MEHTA, 1982. *Modeling of Estuarial Fine Sediment Transport for Tracking Pollutant Movement*. UFL/COEL-82/009. Coastal and Oceanographic Engineering Department, University of Florida.

IPPEN A.T. et D.R.F. HARLEMAN, 1961. *One-dimensional of salinity intrusion in estuaries*. Committee on Tidal Hydraulics US Army Corps of Engineers, Tech. Bull. **5**.

JACQUET J., 1949. Recherches écologiques sur le littoral de la Manche, les prés salés et la Spartine de Townsend. *In:* LECHEVALIER (Ed.), *Encyclopédie biogéographique et écologique*, Paris.

JAY A.J., GEYER W.R. et D.R. MONTGOMERY, 2000. An ecological perspective on estuarine classification. *In:* HOBBIE J.E. (Ed.), *Estuarine science: a synthetic approach to research and practice*, Island Press: 149-176.

JAY D.A. et J.D. SMITH, 1988. Circulation in and classification of shallow, stratified estuaries. *In:* DRONKERS J. et W. Van LEUSSEN (Eds.), *Physical Processes in Estuaries*, Springer-Verlag: 21-41.

JIGOREL A., 1996. Effects of environmental change on European salt-marshes. Environment research programme (1990-1994). Final report EUROSAM, Volume 2: 7-37.

JILLAVENKATESA A., DAPKUNAS S.J. et L.H. LUM, 2001. *Particle size characterisation*. Materials Science and Engineering Laboratory. Publication 960-1.

KENYON N.H. et A.H. STRIDE, 1970. The tide swept continental shelf sediments between the Shetland Isles and France. *Sedimentology* **14**: 159-173.

KETCHUM B.H., 1951. The flushing of tidal estuaries. *Sewage Ind. Wastes* **23**: 198-209.

KIRBY R. et W.R. PARKER, 1983. Distribution and behaviour of fine sediment in the Severn estuary and inner Bristol Channel, U.K.. In: Gordon D.C. Jr et A.S. Hourston (Eds.), Dynamics of coastal turbid environment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* **40** (1): 83-95.

KNIGHT-JONES E.W., KNIGHT-JONES P. et A. NELSON-SMITH, 1995. Chapter 6: Annelids. *In:* HAYWARD P.J. et J.S. RYLAND (Eds.), *Handbook of the marine fauna of North East Europe*, Oxford University Press: 165-277.

KRANCK K. et T.G. MILLIGAN, 1992. Grain size in oceanography. *In:* SYVITSKI J.P.M. (Ed.), *Principles, methods and application of particule size analysis*, Cambridge University Press: 332-345.

KRONE R.B., 1962. *Flume studies of the transport of sediment in estuarine shoaling processes*. Technical report of Hydraulic Engineering Laboratory, University of South Carolina.

KRUMBEIN W.C., 1938. Size-frequency distributions of sediments and the normal phi curve. *Journal of Sedimentary Petrology* **8**: 84-90.

LAFITE R., 1990. *Caractérisation et dynamique des particules en suspension dans un domaine macrotidal influencé par un estuaire : exemple de la baie de Seine orientale (France)*. Thèse de Doctorat, Université de Rouen.

LAHAYE S., 2001. *Evolution des paramètres physico-chimiques durant des cycles de marée dans la baie de l'Authie*. Maîtrise de Chimie, Université des Sciences et Technologies de Lille.

LAIBE M., 2003. Etude des conditions expérimentales pour l'analyse granulométrique de sédiments silteux et argileux par diffraction laser. Mémoire d'Ingénieur, CUST Clermont Ferrant.

LANZONI S. et G. SEMINARA, 1998. On tide propagation in convergent estuaries. *Journal of Geophysical Research* **103**: 30793–30812.

LARSONNEUR C., 1977. La cartographie des dépôts meubles sur le plateau continental français : méthode mise au point et utilisée en Manche. *Journal de Recherche Océanographique* **23**: 33-39.

LARSONNEUR C., BOUYSSE P. et J.P. AUFFRET, 1982. The surficial sediments of the English Channel and its western approaches. *Sedimentology* **29**: 851-864.

LATTEUX B., 1999. *Baie d'Authie: synthèse et analyse des données naturelles*. Rapport Conseil Général du Pas-de-Calais.

LAWLER D.M., 2005. The importance of high-resolution monitoring in erosion and deposition dynamics studies: examples from estuarine and fluvial systems: *Geomorphology* **64**: 1-23.

LEATHERMAN S.P., 1983. Shoreline mapping : A comparison of techniques. *Shore and Beaches* **51**: 28-33.

LE HIR P., MONBET Y. et F. ORVAIN, 2007**.** Sediment erodability in sediment transport modelling: Can we account for biota effects? *Continental Shelf Research* **27** (8): 1116-1142.

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, Université de Caen.

LESOURD S., BRUN-COTTAN J.-C., LESUEUR P., DELOFFRE J., LAFITE R., CAILLAUD J. et S. PHILIPPE, 2005. *Etude expérimentale du tassement des vases de l'estuaire de la Seine*. Seine Aval III : Morphodynamiques, cycle des vases et contaminants associés.

LESSA G.C., 2000. Morphodynamic controls on tides and currents in two macrotidal shallow estuaries, NE Australia. *Journal of Coastal Research* **16** (4): 976-989.

LESSA G.C., 1995. Morphological evolution of macrotidal estuarine channels – central Queensland, Australia. *The European Geographer* **9**: 152-171.

LESSA G.C. et G. MASSELINK, 1995. Morphodynamic evolution of a macrotidal barrier estuary. *Marine Geology* **129** (1-2): 25-46.

LEVOY F., ANTHONY E.J., BARUSSEAU J.P., HOWA H. et B. TESSIER, 1998. Morphodynamique d'une plage macrotidale à barres. *C. R. Acad. Sci. Sciences de la terre et des planètes* **327**: 811-818.

LEVOY F., ANTHONY E.J., MONFORT O. et C. LARSONNEUR, 2000. The morphodynamic of megatidal beaches in Normandy, France: implications for the application of beach environmental parameters. *Marine Geology* **17**: 39-59.

LOFI J. et 0. WEBER, 2001. SCOPIX - digital processing of X-ray images for the enhancement of sedimentary structures in undisturbed core slabs. *Geo-Marine Letters* **20**: 182-186.

LONG A. J., SCAIFE R.G. et R.J. EDWARDS, 2000. Stratigraphic architecture, relative sea-level, and models of estuary development in southern England: new data from Southampton Water. *In:* PYE K. et J.R.L ALLEN (Eds), *Coastal and Estuarine Environments: Sedimentoplogy, Geomorphology and Geoarchaeology*, Geological society Special Publication **175**: 253-177.

LONG A. J. et J. B. INNES, 1993. Holocene sea-level changes and coastal sedimentation in Romney Marsh, southeast England, UK. *Proceedings of the Geologists' Association* **104**: 223-237.

LOUCHE B., 1996. *Limites littorales de la nappe de craie dans la région Nord-Pas-de-Calais, relation eaux souterraines-mer-eaux superficielles.* Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.

LUDDENS, A., 2003. Etude de la composition des particules en suspension dans l'estuaire de l'Authie : Analyses des marqueurs biogéochimiques par CPG. Maîtrise de Chimie, Université des Sciences et Technologies de Lille.

MAA J.P.-Y. et A.J. MEHTA, 1987. Mud erosion by waves: a laboratory study. *Continental Shelf Research* **7**: 1269-1284.

McANALLY W.H., 1999. *Aggregation and deposition of estuarine fine sediment*. PhD Thesis, University of Florida.

MACLAREN P., 1981. An interpretation of trends in grain size measures. *Journal of Sedimentary Petrology*, **51**: 611-624.

MANSY J.-L., MANBY G.M., AVERBUCH O., EVERAERTS M., BERGERAT F., VAN VLIET-LANOE B., LAMARCHE J. et S. VANDYCKE, 2003. Dynamics and inversion of the Mesozoic

Basin of the Weald–Boulonnais area: role of basement reactivation. *Tectonophysics* **373**: 161- 179.

MARION C., ANTHONY E.J. et A. TRENTESAUX, 2007a. Quantification of sediment transport and deposition over macrotidal salt marshes: results with regards to *Spartina anglica* impacts from a mid-term survey (Authie estuary, France). INTERCOH 07, 25th-28th september 2007, Brest.

MARION C., ANTHONY E.J. et A. TRENTESAUX, 2007b. Quantification of sediment transport and deposition over macrotidal salt marshes: results with regards to *Spartina anglica* impacts from a mid-term survey (Authie estuary, France). INTERCOH 07, 25th-28th september 2007, Brest.

MARION C., ANTHONY E.J. et A. TRENTESAUX, 2005. Multi-technique surveys of sediment transport and deposition in a managed estuary: the Authie estuary, Northern France. *In*: HERRIER J.-L., J. MEES, A. SALMAN, J. SEYS, H. VAN NIEUWENHUYSE et I. DOBBELAERE *(Eds.*), *Proceedings Dunes and Estuaries 2005, VLIZ Special Publication* **19**: 219-228

MARION C., GILPIN M.B. et E.J. ANTHONY, 2004. A multi-sensor OBS for sediment transport study: Quantification of fluxes over a mudflat, Authie estuary, Northern France. International Association of Sedimentology 23th Conference "Sedimentology and Society", September 15th -17th 2004, Coimbra, Portugal.

MARION C., ANTHONY E.J. and A. TRENTESAUX, 2004. Tidal influence on fine sedimentation in a macrotidal estuary: the Authie, northern France. 6th International Conference on Tidal Sedimentology *Tidalites 2004*, August 2d-5th 2004, Copenhagen, Denmark.

MARION C., TRENTESAUX A., ANTHONY E.J., BILLON G. and J.-L. REYSS, 2004. Spatio-temporal trends in salt marsh sedimentation in a macrotidal estuary: preliminary assessment of the recent infilling of the Authie, northern France. 6th International Conference on Tidal Sedimentology *Tidalites 2004*, August 2d-5th 2004, Copenhagen, Denmark.

MASSELINK G. et M.G. HUGHES, 2003. *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Oxford University Press.

MEHTA A.J., 1991. Understanding fluid mud in a dynamic environment. *Geo-marine Letters 11*: 113-118.

MEHTA A.J. et Y. LI, 1997. *A PC based short course on fine-grained sediment transport engineering*. Coastal and Oceanographic Engineering Department, University of Florida.

MIGEON S., WEBER 0., FAUGERES J.-C. et J. SAINT-PAUL, 1999. SCOPIX: A new X-ray imaging system for core analysis. *Geo-Marine Letters* **18**: pp 251-255.

MIGNIOT C., 1968. Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamqiues. *La Houille Blanche* **7**: 9-47.

MIGNIOT C., 1989. Tassement et rhéologie des vases: *La Houille Blanche* **1-2**: 11-29 et 95-111.

MITCHENER H., TORFS H. et R. WHITEHOUSE, 1996. Erosion of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering* **29** (1-2): 1–25.

MÖLLER I., 2006. Quantifying saltmarsh vegetation and its effect on wave height dissipation: Results from a UK East coast saltmarsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **69** (3-4): 337-351

MÖLLER I., SPENCER T., FRENCH J.R., LEGGETT D.J. et M. DIXON, 2001. The sea-defence value of salt marshes: Field evidence from North Norfolk. *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management* **15** (2): 109-116.

MORZADEC-KERFOURN M.T., 1974. Variations da la ligne de rivage armoricaine au Quaternaire. Analyses polliniques de dépôts organiques littoraux. *Mém. Soc. géol. Mineral*. Bretagne **17**.

MRANI-ALAOUI Méha, 2006. *Evolution des environnements sédimentaires holocènes de la plaine maritime flamande du nord de la France : eustatisme et processus*. Thèse de Doctorat de Géographie physique, Université du Littoral Côte d'Opale.

MOUCHEL J.-M. et P. BONTE, 1998. *Transfert des MES à l'aval de Paris*. Rapport PIREN-Seine Thème 6 - Particules - Andrésy à Poses.

NICHOLS G., 1999. *Sedimentology and stratigraphy*. Blackwell Science Ltd., Oxford.

NICHOLS M.M. et G. ALLEN, 1981. Sedimentary processes in coastal lagoon. *In:* Coastal Lagoon Research, Present and Future, UNESCO Tech. Pap. Mar. Sci. **33**: 27-80.

NICHOLS M.M. et R.B. BIGGS, 1985. Estuaries. *In:* DAVIS R.A. (Ed.), *Coastal sedimentary environments,* Springer Verlag: 77-186.

●

OLIVIER F., VALLET C., DAUVIN J.-C. et C. RETIÈRE, 1996. 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* **199**: 89-109.

OUDDANE B., 1990. *Comportement des éléments majeurs et mineurs dans un milieu soumis à des gradients physico-chimiques marqués : cas de l'estuaire de la Seine.* Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.

●

PAILLARD D., LABEYRIE L. et P. YIOU, 1996. Analyseries 0.1: a Macintosh software for the analysis of geographical time-series. *EOS transactions* **77**: 379.

PARKINSON R.W., DELAUNE R.D., et J.R. WHITE, 1994. Holocene sealevel rise and the fate of mangrove forests within the wider Caribbean region. *Journal of Coastal Research* **10**: 1077–1086.

PARTHENIADES E., 1962. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division,* ASCE, v. 19, N°HY1: 407-415.

PASKOFF R., 1998 (2ème édition). *Les littoraux : impacts des aménagements sur leur évolution*. Armand Colin.

PEDRERos R., HOWA H.L. et D. MICHEL, 1996. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas. *Marine Geology* **135** (1-4): 35-49.

PEJRUP M., 1988. Flocculated suspended sediment in a micro-tidal environment: *Sedimentary Geology* **57**: 249-256.

PERILLO G.M.E., 1995. Geomorphology and sedimentology of estuaries : an introduction. *In:* PERILLO G.M.E. (Ed.), *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*, *Developments in Sedimentology* **53**, Elsevier: 1-15.

PERILLO G.M.E., 1995. Definitions and geomorphologic classifications of estuaries. *In:* PERILLO G.M.E. (Ed.), *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*, *Developments in Sedimentology* **53**, Elsevier: 17-46.

PETHICK J.S., 1969. Drainage in tidal marshes. *In:* STEERS J.R. (Ed.), *The Coastline of England and Wales* (3rd. edition). Cambridge University Press, Cambridge: 725-730.

PETHICK J.S., 1996. The geomorphology of the mudflats. *In:* Nordstrom K. F et C.T. Roman (Eds.), *Estuarine Shores: Evolution, Environments and Human Alterations*, Wiley et Sons, Chichester, 185-211.

POSTMA H., 1967. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. *American Association of Advanced Science Publications*: 158-179.

PRANDLE D., 1986. Generalized theory of estuarine dynamics. *In:* VAN dE KREEKE J. (Ed.), *Physics on Shallow Estuaries and Bays*, Springer-Verlag: 42-57.

PREECE R.C., SCOURSE J.D., HOUGHTON S.D. et K.L. KNUNDSEN, 1990. The Pleistocene sea-level and neotectonic history of the eastern Solent, southern England. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, B, **328**: 425-477.

PRITCHARD D.W., 1952. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system. *Journal of Marine Research* **11**: 106-123.

PRITCHARD D.W., 1967. What is an estuary: physical viewpoint. *In:* LAUFF G.H. (Ed.), *Estuaries,* AAS Publications: 3-5.

PYE K. et P.W. FRENCH, 1993. *Erosion and accretion on British salt marshes. Volume 3.* National Survey of accretion and erosion status. MAFF

⌣

RAUSS I., 2003. *Spartina anglica C.E. Hubbard, une espèce structurelle et fonctionnelle de l'écosystème marais salé (baie des Veys, baie de Seine occidentale, Manche orientale).* Thèse de doctorat de l'Université de Rennes 1.

REDFIELD A.C., KETCHUM B.H. et F.A. RICHARDS, 1963. The influence of organisms on the composition sea waters. *In:* HILL M.N. (Ed.), *The sea*, New York, Wiley-Intersciences: 26-77.

REED D.J., 1988. Sediment dynamics and deposition in a retreating coastal. salt marsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **26**: 67-79.

REICHMÜTH B., 2003. *Contribution à la connaissance de la morphodynamique des plages à barres intertidales : exemple de la Côte d'Opale, Nord de la France*. Thèse de Doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale.

REINECK H. E. et I. B. SINGH, 1980 (2nd edition). *Depositional sedimentary environments*. *Springer-verlag*.

REINECK H. E. et F. WUNDERLICH, 1968. Classification and origin of flaser and lenticular bedding. *Sedimentology* **11**: 99-104.

RENSCHLER C.S., DOYLE M.W. et M. THOMS, 2007. Geomorphology and ecosystems: challenges and keys for success in bridging disciplines. *Geomorphology* **89**: 1-8.

REYSS J.L., SCHMIDT S., LEGELEUX F. et P. BONTE, 1995. Large, low background well type detectors for measurements of environmental activity. *Nuclear Instruments and Methods* **357**: 391-397.

RIDDERINKHOF H., 1997. The effect of tidal asymmetries on the net transport of sediments in the Ems Dollard estuary. *Journal of Coastal Research* **25**: 41–48.

ROBBE D. et B. ROGER, 1897. *Granulométrie des éléments fins par diffraction laser, présentation et évaluation de la méthode*. Granulométrie, Laboratoire des Ponts et Chaussée **148**.

ROSS M.A., 1989. *Vertical structure of estuarine fine sediment suspensions*. PhD Thesis, University of Florida.

⊙

SALOMON J.-C. et D.G. ALLEN, 1983. Rôle sédimentologique de la marée dans les estuaires à fort marnage. *Compagnie Française des Pétroles*, Notes et Mémoires **18**: 35-44.

SANDERSON E.W., FOIN T.C. et S.L. USTIN, 2001. A simple empirical model of salt marsh plant spatial distributions with respect to a tidal channel network. *Ecological Modelling* **139**: 293-307

SAVOYE N., 2001. *Origine et transfert de matière organique particulaire dans les écosystèmes littoraux macrotidaux*. Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, Brest.

SCHUBEL J.R., 1971. Estuarine circulation and sedimentation. *In:* SCHUBEL J.R. (Ed.), *The Estuarine Environment: Estuaries and Estuarine Sedimentations, Am. Geol. Inst. Short Course Lecture Notes*.

SCHULTZ E.A. et H.B. SIMMONS, 1957. Fresh water-salt water density currents, a major cause of siltation in estuaries. *Committee on Tidal Hydraulics US Army Corps of Engineers, Tech. Bull.* **2:** 28.

SHENNAN I., 2005. Peat. *In:* SCHWARTZ M.L. (Ed.), *Encyclopedia of coastal science*: 762-763.

SHENNAN I., 1986. Flandrien sea-level changes in the Fenland. II: tendencies of sea level movement, altitudinal changes, and local and regional factors. *Journal of Quaternary Science* **1** (2): 155-179.

SHEPARD F.P., 1973. *Submarine geology*. Harper and Row.

SHOM, 1968. *Les courants de marée dans la mer de la Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique*. Service Hydrographique Océanographique et de la Marine 550, Paris.

SIMMONS H.B., 1955. Some effects of upland discharge on estuarine hydraulics. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* **81** (792).

SIPKA V., 1998. *Les plages macrotidales du Nord-Pas-de-Calais : contexte environnemental et caractérisation morphodynamique*. Thèse de doctorat, Université du Littoral - Côte d'Opale.

SMITH G.L. et G.A. ZARILLO, 1989. Calculating long-term shoreline recession rates using aerial photography and beach profiling techniques. *Journal of Coastal Research* **6**: 111-120.

SOGREAH, 1993. *Etude hydraulique du franchissement par l'autoroute A16 de la vallée de l'Authie*. Rapport SANEF/SCET AUTOROUTE.

SOTTOLICHIO A., 1999. *Modélisation de la dynamique des structures turbides (bouchon vaseux et crème de vase) dans l'estuaire de la Gironde*. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I.

SPEER P.E. et D.G. AUBREY, 1985. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems, Part II: theory. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **21**: 207-224.

SPEER P.E., AUBREY D.G. et C.T. FRIEDRICHS, 1991. Nonlinear hydrodynamics of shallow tidal inlet/bay systems. *In:* Parker B.B. (Ed.), *Tidal Hydrodynamics*. Wiley, New York.

STEEL T.J. et K. PYE, 1997. The development of saltmarsh tidal creek networks: Evidence from the U.K. *Proceedings of the Canadian Coastal Conference 1997*: 267-280.

STRAHLER A.N., 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. *In:* VEN TE CHOW (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw Hill, New York: 4-39 et 4-76.

SUANEZ, S. et B. SIMON., 1997. Utilisation de l'analyse diachronique dans l'étude de l'évolution du littoral oriental du Delta du Rhône (France, Sud-Est). *Photo-Interprétation* **35**: 147-153.

SCHUTTELAARS H.M. et H.E. DE SWART, 2000. Multiple morphodinamic equilibria in tidal embayments. *Journal of Geophysical Research* **105**: 24105–24118.

STYLES R., 2006. Laboratory evaluation of the LISST in a stratified fluid. *Marine Geology* **227**: 151-162.

●

TEISSIER B., 1997. *Expressions sédimentaires de la dynamique tidale*. Habilitation à Diriger des Recherches en Sciences Naturelles, Université des Sciences et Technologies de Lille.

TERS M., 1973. Les variations du niveau marin depuis 10000 ans le long du littoral atlantique français. 9ème Congr. Int. INQUA., *Suppl. Bull. Ass. Franç. Etud Quat.* **36**: 114-136.

TESSIER A., CAMPBELL P.G.C. et M. BISSON, 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry* **51**: 844-851.

TEISSON C., OCKENDEN M., LE HIR P., KRANENBURG C. et L. HAMM, 1993. Cohesive sediment transport processes. *Coastal Engineering* **21**: 41-69.

THEILER E.R. et W.W. DANFORTH, 1994. Historical Shoreline Mapping (1): Improving Techniques and Reducing Positioning Errors. *Journal of Coastal Research* **10**: 549-563.

TORFS H., MITCHENER H., HUYSENTRUYT H. et E. TOORMAN, 1996. Settling and consolidation of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering* **29** (1-2): 27-45.

TRENTESAUX A., CUROY J., MARION C., BILLON G., SIONNEAU T., MEURISSE M., VAN VLIET LANÖE B., REYSS J.-L., ANTHONY E.J., MALENGROS D. et M. VANDAELE, 2005. Sedimentary facies and recent evolution of an anthropogenically influenced estuary, the Authie, Northern France. Conference INQUA/IGCP 495 *"Late Quaternary Coastal Changes Sea Level, Sedimentary Forcing and Anthropogenic Impacts"*, June 28th-July 2d 2005, Dunkerque, France.

TRENTESAUX A., CUROY J., MARION C., BILLON G. et J.-L. REYSS, 2003a. Taux de sédimentation en zone estuarienne : de la mesure instantanée à l'enregistrement séculaire. *9ème Congrès Français de Sédimentologie*, 11-19 octobre 2003, Bordeaux , France.

.

UNCLES R.J., 2002. Estuarine physical processes research: some recent studies and progress. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 55: 829-856.

UNCLES R.J., BALE A.J., HOWLAND R.J.M., MORRIS A.W. et R.C.A. ELLIOTT, 1983. Salinity of surface water in a partially-mixed estuary and its dispersion at low run-off. *Oceanologica Acta* **6**: 289-296.

UNCLES R.J., BLOOMER N.J., FRICKERS P.E., GRIFFITHS M.L., HARRIS C.K., HOWLAND R.J.M., MORRIS A.W., PLUMMER D.H. et A.D. TAPPIN, 2000. Seasonal variability of salinity, temperature, turbidity and suspended chlorophyll in the Tweed Estuary. *The Science of Total Environment* **251-252**: 115-124..

⊙

VAN DE KREEKE J., et D.W. DUNSBERGEN, 2000. Tidal asymmetry and sediment transport in Frisian Inlet. *In:* YANAGI T. (Ed.), *Interactions Between Estuaries, Coastal Seas and Shelf Seas*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 2000.

VAN DE KREEKE J. et K.B. ROBACZEWSKA, 1993. Tide induced residual transport of coarse sediment; application to the Ems estuary. *Netherlands Journal of Sea Research* **31** (3): 209-220.

VAN DER SPECK A.J.F., 1997. Tidal asymmetry and long-term evolution of Holocene tidal basins in The Netherlands: simulation of palaeo-tides in the Schelde estuary. *Marine Geology* **141**(1-4): 71-90

VAN HULZEN J.B., VAN SOELEN J. et T.J. BOUMA. 2007. Morphological variation and habitat modification are strongly correlated for the autogenic ecosystem engineer *Spartina anglica* (common cordgrass). *Estuaries and Coasts* **30** (1): 3-11.

VAN KESSEL T. et C. KRANENBURG, 1998. Wave-induced liquefaction and flow of subaqueous mud layers. *Coastal Engineering* **34**: 109-127.

VAN LEUSSEN W., 1988. Aggregation of particles, settling velocities of mud flocs, a review. *Proc. Int. Symp. "Physical processes in estuaries"*, Springer-Verlag: 347-403.

VASSEUR B. et A. HEQUETTE, 2000. Storm surges and erosion of coastal dunes between 1957 and 1988 near Dunkerque (France), southwestern North Sea. *In:* Pye, K. and J.R.L. Allen (Eds.), *Coastal and Estuarine Environments - Sedimentology, Geomorphology and Geoarchaeology*, Special Publications of the Geological Society of London 175 : 99-107.

VERGER F., 2005. *Marais et estuaires du littoral français*. Editions Belin.

VERNEY R., 2006. *Processus de contrôle de la dynamique des sédiments cohésifs: mesures in situ, mesures expérimentales et modélisation ; application à l'estuaire de la Seine.* Thèse de Doctorat, Université de Rouen.

VICAIRE O., 1991. *Dynamique hydrosédimentaire en Mer du Nord méridionale (Du Cap Blanc Nez à la frontière belge).* Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.

VOS P.C. et H. DE WOLF, 1997. Palaeo-environmental diatom study of the Holocene deposits of the Province of Zeeland (SW Netherlands). *Mededelingen Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO* **59**: 111-141.

WALLER M.P., LONG A.J., LONG D. et J.B. INNES, 1999. Patterns and processes in the development of coastal mire vegetation: Multi-site investigations from Walland Marsh, Southeast England. *Quaternary Science Reviews* **18**: 1419-1444.

WANG Z.B., JEUKEN M.C.J.L., GERRITSEN H., de VRIEND H.J. et B.A. KORNMAN, 2002. Morphology and asymmetry of the vertical tide in the Westerschelde estuary. *Continental Shelf Research* **22** (17): 2599-2609.

WEDD M.W., 2003. *Determination of particle Size Distribution Using Laser Diffraction*. Malvern Instruments.

WELLS J.T., 1995. Tide-dominated estuaries and tidal rivers. In: *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries* (Ed. G.M.E. PERILLO), *Delopments in Sedimentology* **53**, Elsevier: 179-206.

WENWORTH C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* **30**: 377-392.

WIDDOWS J. et M. BRINSLEY, 2002. Impact of biotic and abiotic processes on sediment dynamics and the consequences to the structure and functioning of the intertidal zone. *Journal of Sea Research* **48**: 143-156.

WINTERWERP J.C., 2002. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. *Continental Shelf Research* **22**: 1339-1360.

WOODROFFE C.D., 1996. Late Quaternary infill of macrotidal estuaries in northern Australia. *In:* NORDSTROM. K.F. et C.T. ROMAN (Eds.), *Estuarine shores : evolution, environments and human alterations*, Wiley: 89-114.

WOODROFFE C. D., 2002. *Coasts Form, process and evolution*. Cambridge University Press.

WRIGHT L.D. et J.M. COLEMAN, 1973. Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. *Am. Ass. Petrol. Geol.* **57**: 370-398.



***Encyclopædia Britannica* online**
www.britannica.com

EPOC (Environnements et Paléoenvironnements OCéaniques), UMR CNRS 5805, Université de Bordeaux 1
Système SCOPIX, Portail ASF (Association des Sédimentologues Français)
www.epoc.u-bordeaux.fr

ForumSIG
Forum d'aide et d'information sur les systèmes d'information géographique
www.forumsig.org

GEMEL (Groupe des Milieux Estuariens et Littoraux)
Association - Equipe pluridisciplinaire de recherche
www.gemel.org

IFREMER, Dynamique et Santé des Ecosystèmes Côtiers Estuariens
Présentation de l'altimètre Altus
www.ifremer.fr/delec/tp/altus.htm

IRSN Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
www.irsn.org

SHOM (Service Hydrographique et Océanologique de la Marine)
Prédiction de la marée
www.shom.fr

WindGURU
Prévisions et archives de données météorologiques
www.windguru.cz

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION

Figure 0.1. Répartition mondiale des littoraux mégatidaux (en rouge) d'après Levoy *et al*. (2000). 2

Figure 0.1. *World distribution of megatidal coasts (in red) from Levoy et al. (2000).* *2*

Figure 0.2. Répartition mondiale des côtes mixtes co-dominées par la houle et la marée (en bleu) d'après Anthony et Orford (2002). 3

Figure 0.2. *World distribution of mixed wave-tide-dominated coasts (WTD coasts) (in blue) from Anthony and Orford (2002).* *3*

Figure 0.3. Répartition mondiale des marais salés tempérés (en vert) et des mangroves (en jaune) d'après web *Encyclopædia Britannica* (1997). 4

Figure 0.3. *World distribution of temperate salt marshes (in green) and mangrove swamps (in yellow) from web Encyclopædia Britannica (1997).* *4*

Figure 0.4. Principaux compartiments impliqués dans l'évolution des systèmes sédimentaires estuariens – adapté d'un schéma de morphodynamique des côtes de Masselink et Hughes (2003). 8

Figure 0.4. *Primary components involved in the evolution of estuarine sedimentary systems – adapted from a coastal morphodynamic framework by Masselink and Hughes (2003).* *8*

CHAPITRE I :
ASPECTS GENERAUX

Figure 1.1. Différentes parties d'un estuaire, d'après Dionne (1963). 11

Figure 1.1. *Different parts of an estuary, from Dionne (1963).* *11*

Figure 1.2. Types d'estuaires associés à leur morphologie, d'après Nichols et Biggs (1985). 14

Figure 1.2. *Estuary types and their morphology, from Nichols and Biggs (1985).* *14*

Figure 1.3. Diagramme situant les estuaires selon leur morphologie (Dyer, 1995 d'après Friedrichs et Aubrey, 1988). 15

Figure 1.3. *Diagram of estuarine tidal type as a function of morphology (Dyer, 1995 from Friedrichs et Aubrey, 1988).* *15*

Figure 1.4. Classification évolutive de Dalrymple *et al.* (1992). 17

Figure 1.4. *Evolutive classification of Dalrymple et al. (1992).* *17*

Figure 1.5. Typologie des estuaires et distribution des processus dynamiques, d'après Dalrymple *et al.* (1992). 19

Figure 1.5. *Typology of estuaries and dynamical processes distribution, from Dalrymple et al. (1992).* *19*

Figure 1.6. Schématisation de la classification de Cameron et Pritchard (1963), d'après Dyer (1997). **A.** Postulat de base ; **B.** Estuaire fortement stratifié ; **C.** Estuaire partiellement mélangé ; **D.** Estuaire bien mélangé. 21

Figure 1.6. *Simplification of the Cameron and Pritchard (1963) classification, from Dyer (1997).* ***A.*** *Basic premise;* ***B.*** *Highly stratified estuary;* ***C.*** *Partially mixed estuary;* ***D.*** *Well mixed estuary.* *21*

Figure 1.7. Diagramme de circulation - stratification (Jay *et al.*, 2000). 24

Figure 1.7. *Circulation - stratification diagram (Jay et al., 2000).* *24*

Figure 1.8. Diagramme des niveaux de stratification, d'après Jay et Smith (1988). 25

Figure 1.8. *Diagram of stratification levels, from Jay and Smith (1988).* *25*

Figure 1.9. Classifications proposées pour les estuaires : descriptions, innovations (en gras) et correspondances (interaction et équivalence). 27

Figure 1.9. *Proposed classifications for estuaries: descriptions, innovations (in bold) and correspondences (interaction and equivalence).* *27*

Figure 1.10. Délimitation d'un estuaire selon différents auteurs (d'après Perillo, 2000). 28

Figure 1.10. *Demarcation of an estuary according to different authors (from Perillo, 2000).* *28*

Figure 1.11. Différentes sources du matériel en suspension qui transite en milieu estuarien (Eisma, 1993). 30

Figure 1.11. *Different sinks of suspended material transported in the estuarine domain (Eisma, 1993).* *30*

Figure 1.12. Taille des principaux constituants organiques et inorganiques des MES (Verney, 2006). 33

Figure 1.12. *Size of SPM principal inorganic and organic constituents (Verney, 2006).* *33*

Figure 1.13. Evolution de la taille des MES en relation avec la vitesse de chute des particules (Dupont, 2001). 34

Figure 1.13. *Evolution of SPM size in relation with particle settling velocity (Dupont, 2001).* *34*

Figure 1.14. Formation du maximum de turbidité 35
A. Par circulation de gravité (d'après Dyer, 1997) ; **B.** Par asymétrie tidale (d'après Allen *et al*., 1980).

Figure 1.14. *Turbidity maximum formation* *35*
A. *Via gravitational circulation (from Dyer, 1997);* ***B.*** *Via tidal asymmetry (from Allen et al., 1980).*

Figure 1.15. Formation et relation des différentes couches turbides 37
A. Profil vertical de concentration (d'après Ross et Mehta, 1989) ;
B. Relation entre les différentes couches turbides (d'après Kirby et Parker, 1983).

Figure 1.15. *Formation of and relation between different turbid layers* *37*
A. *Vertical profile of concentration (from Ross and Mehta, 1989);*
B. *Relation between different turbid layers (from Kirby and Parker, 1983).*

Figure 1.16. Exemple d'interactions entre échelle spatiale et processus en action (Widdows et Brinsley, 2002). 39

Figure 1.16. *Examples of interactions between spatial scales and active processes (Widdows and Brinsley, 2002).* *39*

Figure 1.17. Carte géologique et structurale simplifiée de la zone côtière du Nord - Pas-de-Calais (Augris *et al*., 1990). 40

Figure 1.17. *Simplified geological and structural map of Nord - Pas-de-Calais coastal area (Augris et al., 1990).* *40*

Figure 1.18. Morphologie du littoral du Nord – Pas-de-Calais. 41

Figure 1.18. *Morphology of Nord –Pas-de-Calais littoral.* *41*

Figure 1.19. Roses des vents sur la façade de la Côte d'Opale sur la période 1980-1994 (Source MétéoFrance, Données statistiques N°11 in Sipka, 1998). 43

Figure 1.19. *Wind roses for the Côte d'Opale shore over the period 1980-1994 (Source MétéoFrance, Données statistiques N°11 in Sipka, 1998).* *43*

Figure 1.20. Rose des houles (Bonnefille et Allen, 1967). 44

Figure 1.20. *Wave roses (Bonnefille and Allen, 1967).* *44*

Figure 1.21. Vitesse des courants de marées en Manche ($m.s^{-1}$) (SHOM, 1968). 46

Figure 1.21. *Tidal current velocity within the Manche ($m.s^{-1}$) (SHOM, 1968).* *46*

Figure 1.22. Couverture sédimentaire et transport de sable (Anthony, 2002). 47

Figure 1.22. *Sedimentary cover and sand transport (Anthony, 2002).* *47*

Figure 1.23. Les trois estuaires « picards » : Somme, Authie et Canche. 49
A. Localisation ; **B.** Image satellite (SPOT, 1991) ; **C.** Photographies aériennes (SIG Littoral, 2000) : **1.** Canche, **2.** Authie et **3.** Somme ; **D.** Cartographie des marais et espaces estuariens picards (Verger, 2005).

Figure 1.23. *The three « picard » estuaries: Somme, Authie et Canche.* *49*
A. *Location;* ***B.*** *Satellite picture (SPOT, 1991);* ***C.*** *Aerial photographs (SIG Littoral, 2000):* ***1.*** *Canche,* ***2.*** *Authie and* ***3.*** *Somme; D. Map of salt marshes and « picard » estuarine areas (Verger, 2005).*

CHAPITRE II :
APPROCHE METHODOLOGIQUE ET TECHNIQUES D'ETUDE

Figure 2.1. Exemple de relation entre échelle temporelle et processus en action : diagramme schématique des facteurs contrôlant la sédimentation sur un marais salé à trois échelles temporelles (d'après Davidson-Arnott *et al.*, 2002). 54

Figure 2.1. *Example of relationship between temporal scale and active processes: simplified diagram of factors controlling sedimentation over a salt marsh according to three temporal scales (from Davidson-Arnott et al., 2002).* *54*

Figure 2.2. Topographie au tachéomètre 56
A. « Mire » composé d'une perche surmontée d'un réflecteur ;
B. Acquisition d'un point sur le terrain par l'opérateur ; **C.** Tachéomètre installé en haut de dune.

Figure 2.2. *Topography using total station* ***56***
A. *Levelling staff;*
B. *Field acquisition of a referenced point by an operator;* ***C.*** *Total station deployed in upper dunes.*

Figure 2.3. Principe de la mesure LIDAR. 58

Figure 2.3. *LIDAR measurement principle.* *58*

Figure 2.4. Comparaison des mesures au tachéomètre et au LIDAR sur le profil et corrélation 59
A. Profil 1 : estran sableux ; **B.** Profil 2 : estran vaseux et marais salé ; **C.** Profil 4 : marais salés.

Figure 2.4. *Comparison of LIDAR and total station data over the same profile and correlation* *59*
A. *Profile 1: sandy tidal flat;* ***B.*** *Profile 2: salt marshes and mudflat;* ***C.*** *Profile 4: salt marshes.*

Figure 2.5. Interactions entre lumière laser et particule représentées par la théorie de Mie. 61

Figure 2.5. *Interactions between laser light and particle represented by Mie theory.* *61*

Figure 2.6. Granulométrie laser 62
A. Protocole de mesure ; **B.** Granulomètre laser MALVERN Mastersizer 2000 (PBDS, USTL).

Figure 2.6. *Laser grain-sizer* *62*
B. *Measurement procedure;* ***B.*** *Grain-sizer MALVERN Mastersizer 2000 (PBDS, USTL).*

Figure 2.7. Calcul des indices granulométrique par la méthode dite des moments statistiques. 64

Figure 2.7. *Formulae of grain-size indexes with the statistics moments method.* *64*

Figure 2.8. Diffractométrie à Rayons X 67
A. Diffractomètre (PBDS, USTL) ; **B.** Exemple de diffractogramme.

Figure 2.8. *X Rays diffractometry* *67*
A. *Diffractometer (PBDS, USTL);* ***B.*** *Example of a diffractogram.*

Figure 2.9. Exemple de rhéogramme (cas théorique) (d'après Lesourd, 2000). 68

Figure 2.9. *Example of rheogram (theoretical case) (from Lesourd, 2000).* *68*

Figure 2.10. S4 *ADW* 70
A. S4 déployé à l'extérieur de la vasière principale ; **B.** Schéma de l'instrument.

Figure 2.10. *S4 ADW* *70*
A. *S4 deployment in the external part of the main mudflat;* ***B.*** *Instrument diagram.*

Figure 2.11. ADCP 71
A. ADCP déployé à l'extérieur de la vasière principale ; **B.** Schéma de l'instrument.

Figure 2.11. *ADCP* *71*
A. *ADCP deployment in the external part of the main mudflat;* ***B.*** *Instrument diagram.*

Figure 2.12. ADV 72
A. ADV déployé près de la zone pionnière dans la vasière principale ; **B.** Schéma de l'instrument ;
C. Détail des transducteurs d'émission et de réception et de la cellule de mesure.

Figure 2.12. *ADV* *72*
A. *ADV deployment near the pioneer zone in the main mudflat;* ***B.*** *Instrument diagram;*
C. *Details of emitting and receipting transducers and of measurement cell.*

Figure 2.13. Exemple de décomposition de courant sur un chenal de marée : le vecteur de courant moyen (Vm) est décomposé en vitesses transversales (Vt) et longitudinales (Vl). 74

Figure 2.13. *Example of current decomposition on a tidal channel: the mean current vector (Vm) is decomposed into cross-shore (Vt) and longshore (Vl) currents.* *74*

Figure 2.14 Corrélations des mesures entre un ADCP (abscisses) et un S4ADW (ordonnées) obtenues lors d'un co-déploiement en baie de Wissant (Sedrati, 2006). 75

Figure 2.14 *Correlations between an ADCP (abscissa) and an S4ADW (ordinates) measurements obtained during a co-deployment in Wissant bay (Sedrati, 2006).* *75*

Figure 2.15. Systèmes de pompages utilisés pour les prélèvements d'eau 77
A. Station de pompage sur deux niveaux à la Madelon : perche libre avec flotteur échantillonnant à 10 cm de profondeur, un deuxième tuyau restant fixé par un lest à 10 cm du fond (CAM, USTL) ;
B. Station de pompage sur trois niveaux fixes dans un chenal de marée (GéoDAL, ULCO) avant et pendant la marée.

Figure 2.15. *Pumping systems used for water sampling* *77*
A. *Pumping station with two levels at la Madelon: free pole with float sampling at 10 cm from surface, a second pipe is fixed at 10 cm above the bed (CAM, USTL) ;*
B. *Pumping station with three fixed levels in a tidal channel (GéoDAL, ULCO) before and during the tidal rise.*

Figure 2.16. ASM-IV 79
A. Schéma de l'instrument ; **B.** Zoom sur le réseau de capteurs optiques ;
C. ASM-IV déployé sur la partie supérieure de la vasière principale de l'Authie.

Figure 2.16. *ASM-IV* *79*
A. *Instrument diagram;* ***B.*** *Zoom of the optical sensor network;*
C. *ASM-IV deployed near the pioneer zone in the Authie main mudflat.*

Figure 2.17. Calibration de l'ASM-IV 80
A. Cuve de calibration (Greenwich University) ; **B.** Série de calibration : chaque réduction de la réflectance correspond à une dilution de la charge en sédiment de l'eau circulant dans la cuve ;
C. Droite de régression polynomiale obtenue pour un capteur optique.

Figure 2.17. *ASM-IV calibration* *80*
A. *Calibration tank (Greenwich University);* ***B.*** *Calibration series: each reflectivity reduction corresponds to a diminution of sediment load in the circulating water of the tank;*
C. *Polynomial regression curve obtained for one optical sensor.*

Figure 2.18. Exemple de résultats obtenus avec l'ASM-IV : « instantanés » du transport sédimentaire durant une marée après conversion en concentration de MES (les aires noires de part et d'autre correspondant à des hauteurs où les capteurs sont hors de l'eau, celle en dessous au niveau du lit sédimentaire). 81

Figure 2.18. *Example of results obtained with the ASM-IV: « snapshots » of sediment transport during one tide after conversion into SPM concentration (black areas at the right and left corresponding to levels where sensors are uncovered by water, the one above to le level of sediment bed).* *81*

Figure 2.19. LISST-25X 82
A. Schéma de l'instrument ; **B.** Détail du fonctionnement de la cellule de mesure ; **C.** Déploiement sur le terrain.

Figure 2.19. *LISST-25X* *82*
A. *Instrument diagram;* ***B.*** *Detail of cell measurement;* ***C.*** *Fieldwork deployment.*

Figure 2.20. ESST 86
A. Schéma du piège à sédiment et principe de fonctionnement (adapté de Charman, 2004) ;
B. Installation sur site (la Madelon).

Figure 2.20. *ESST* *86*
A. *Sediment trap diagram and functioning principle (from Charman, 2004);*
B. *Field deployment (la Madelon).*

Figure 2.21. Exemple de résultats : sédiments déposés dans le cylindre central après un cycle tidal où de nombreuses laminations peuvent être observées (adapté de Charman, 2004). 86

Figure 2.21. *Example of results: deposited sediment in the central cylinder after a tidal cycle where numerous laminations can be observed (from Charman, 2004).* *86*

Figure 2.22. Porte-filtres 88
A. Schéma du système (d'après Jigorel, 1996) ; **B.** Station dans la zone pionnière à Spartine;
C. Station dans un schorre à Obione ; **D.** Station avec deux systèmes comparant les apports par marée et par cycle semi-lunaire.

Figure 2.22. *Filter racks* *88*
A. *Filter rack diagram (from Jigorel, 1996);* ***B.*** *Station in Spartina pioneer zone;*
C. *Station in a Halimonium portucolaides salt marsh;* ***D.*** *Station with two racks to compare the inputs over each tide and over a semi-lunar cycle.*

Figure 2.23. Altimètre 89
A. Détail des composant de l'Altus (Deloffre, 2005) ;
B. Altus sur site ; **C.** Schéma du déploiement (Ifremer).

Figure 2.23. *Altimeter* *89*
A. *Detail of Altus components (Deloffre, 2005);*
B. *Altus field deployment;* ***C.*** *Deployment diagram (Ifremer).*

Figure 2.24. Schéma du RSET (Rod Sedimentation-Elevation Table) (d'après Cahoon *et al*., 2002). 90

Figure 2.24. *RSET diagram (Rod Sedimentation-Elevation Table) (from Cahoon et al., 2002).* *90*

Figure 2.25. Vibro-carottage 91
A. Installation de l'échelle supportant le marteau piqueur (rive Nord) ; **B.** Les tubes en aluminium sont enfoncés mécaniquement dans le sol ; **C.** La carotte est réalisée, il faut maintenant l'extraire.

Figure 2.25. *Vibro-coring* *91*
A. *Installation of the ladder supporting the vibro-corer (northern bank);* ***B.*** *Aluminium tubes are driven mechanically into the ground;* ***C.*** *The core waiting to be extracted.*

Figure 2.26. Radioscopie (web EPOC) 93
A. Banc de radioscopie (SCOPIX) ; **B.** Exemple de résultat.

Figure 2.26. *Radioscopy (web EPOC)* *93*
A. *Radioscopy bench (SCOPIX);* ***B.*** *Example of result.*

Figure 2.27. Sismique très haute résolution 94
A. « Poisson » émetteur-récepteur ; **B.** Câble de connection et de traction ; **C.** Unité PC et écrans de contrôle ; **D.** Deuxième unité PC (pont entre le PC principal et le poisson, comprends les accumulateurs nécessaires à l'alimentation du « poisson »).

Figure 2.27. *Very high resolution seismic system* *94*
A. *Emitting-receiving "fish";* ***B.*** *Cable of connection and traction;* ***C.*** *PC unit and control screens;*
D. *Second PC unit (bridge between the principal PC unit and the "fish", comprising energy source for the "fish").*

Figure 2.28. Equipement en place 95
A. Installation de l'unité de pilotage dans un petit bateau de pêche côtière (Centre nautique des Sternes) ;
B. Bras articulé positionnant le « poisson ».

Figure 2.28. *In situ equipment* *95*
A. *Installation of the running unit in a small fishing boat (Centre nautique des Sternes);*
B. *Articulated arm positioning the « fish ».*

Figure 2.29. Géoradar et prospection électromagnétique 96
A. Dispositif de mesure, à gauche le SIR 3000 et à droite l'antenne 400MHz ; **B.** Exemple d'image obtenue par le géoradar (web G-co SARL); **C.** GEM 300 (web GSSI).

Figure 2.29. *Ground penetrating radar and electromagnetic prospecting* *96*
A. *Measurement device, SIR 3000 on the left and 400MHz antenna on the right;* ***B.*** *Example of picture obtained with ground penetrating radar (web G-co SARL);* ***C.*** *GEM 300 (web GSSI).*

Figure 2.30. Méthodologie utilisée pour dater sur les carottes la transition slikke/schorre (Curoy, 2002). 97

Figure 2.30. *Method used for mudflat/salt marsh transition dating in cores (Curoy, 2002).* *97*

Figure 2.31. Spectrométrie gamma 98
A. Spectromètre et détail de la cuve (CER, Sussex University) ; **B.** Spectre gamma d'un échantillon de sédiment prélevé dans une carotte de l'estuaire de l'Authie (Billon, 2001).

Figure 2.31. *Gamma spectrometry* *98*
A. *Spectrometer and detail of the tank (CER, Sussex University);* ***B.*** *Gamma spectra of a sediment sample from a core taken in the Authie estuary (Billon, 2001).*

Figure 2.32. Cycles de formation du ^{210}Pb. 99

Figure 2.32. ^{210}Pb formation cycles. 99

Figure 2.33. Type d'abstraction du monde réel par SIG (web ForumSIG) 103
A. Terrain géoréférencé ; **B.** Mode raster (image) : une valeur par pixel ; **C.** Mode vecteur (lignes, points).

Figure 2.33. *Real world abstraction type with SIG (web ForumSIG)* *103*
A. *Georeferenced field ;* ***B.*** *Raster mode (image) : one value per pixel ;* ***C.*** *Vector mode (lines, points).*

Figure 2.34. Réseau de chenaux sur un marais salé et ordination, selon Strahler (1964). 104

Figure 2.34. *Tidal channel network on a salt marsh and ordination, according to Strahler (1964).* *104*

CHAPITRE III :

MORPHODYNAMIQUE GENERALE DE L'ESTUAIRE DE L'AUTHIE

Figure 3.1. Principaux aspects de la morphologie de l'estuaire de l'Authie (Trentesaux, 2005) 108
A. Embouchure présentant des deltas de flot et de jusant, bordée de plages à barres et à bâches ; **B.** Cordons dunaires ; **C.** Poulier ; **D.** Musoir ; **E.** Chenal principal et nombreux chenaux de marée ; **F.** Vasières ; **G.** Marais salés ; **H.** Polders.

Figure 3.1. *Main aspects of the Authie estuary morphology (Trentesaux, 2005)* *108*
A. *Estuary mouth presenting flood and ebb deltas, bordered by beaches with ridges and runnels;* ***B.*** *Dunes;* ***C.*** *"Poulier" (estuarine accreting cell with sand spit);* ***D.*** *"Musoir"(estuarine eroding cell);* ***E.*** *Main channel and numerous tidal creeks;* ***F.*** *Mudflats;* ***G.*** *Salt marshes;* ***H.*** *Embankments.*

Figure 3.2. Chronologie des aménagements de la rive Nord de l'estuaire (d'après Dobroniak et Anthony, 2002). 109

Figure 3.2. *Chronology of northern bank management (from Dobroniak and Anthony, 2002).* *109*

Figure 3.3. Topographie de l'embouchure de l'estuaire 110
A. Localisation des profils ; **B.** Poulier (profils 1 et 2) ; **C.** Musoir (profils 3 et 4) et flèche sableuse interne (profil 5).

Figure 3.3. *Estuary mouth topography* *110*
A. *Profile location;* ***B.*** *"Poulier" (profiles 1 and 2);* ***C.*** *"Musoir" (profiles 3 and 4) and internal sand spit (profile 5).*

Figure 3.4. Lutte contre l'érosion et témoins du recul dunaire 111
A. Brise-lame (1ère anse); **B.** Enrochements (2ème anse) et début de la 3ème anse ; **C.** Témoignages du recul des dunes (3ème anse) : réimplantation sur l'estran en 2004 d'une tête de station en haut de dune en 1999 (à gauche) et banc de tourbe se fragmentant (à droite).

Figure 3.4. *Fight against erosion and indices of dune erosion* *111*
A. *Breakwater (1st cove);* ***B.*** *Rock armouring (2nd cove) and beginning of the 3rd cove;* ***C.*** *Dune erosion signs (3rd cove): relocation of a benchmark in the tidal flat (2004) previously located in the upper dune in 1999 (on the left) and fragmented peat layer (on the right).*

Figure 3.5. Principales caractéristiques du musoir 112
A. Passe tidale et dunes embryonnaires ; **B.** Cordons successifs de dunes ; **D.** Détail des mégarides (chenal principal, avant la flèche sableuse interne).

Figure 3.5. *"Musoir" main characteristics* *112*
A. *Tidal pass;* ***B.*** *Successive dune ridges;* ***D.*** *Megaripples (main channel, before the inner sand spit).*

Figure 3.6. Topographie de l'estuaire moyen selon six profils Sud-Nord d'aval en amont de l'estuaire (les élévations sont exprimées par rapport à la cote IGN69). 114

Figure 3.6. *Mid estuary topography with six North-South profiles from downstream to upstream (elevations are expressed with regards to IGN69 system).* *114*

Figure 3.7. Modèles numériques de terrains (MNT) réalisés à partir des données LIDAR 116
A. MNT « en relief » ; **B.** MNT contouré ; **C.** MNT présentant les niveaux moyens de la marée.

Figure 3.7. *Elevation Digital Models (DEM) realised from LIDAR data* *116*
A. *DEM « in relief »;* ***B.*** *DEM outlined;* ***C.*** *DEM showing mean levels of tide.*

Figure 3.8. Répartition des différentes unités géomorphologiques (modifié de Dobroniak et Anthony, 2002). 117

Figure 3.8. *Distribution of the different geomorphological units (modified from Dobroniak and Anthony, 2002).* *117*

Figure 3.9. Classifications des marais salés et de leurs chenaux (d'après Pye et French, 1993a) 118
A. Classification géomorphologique des marais salés : marais frangeants **(a)** et d'arrière barrière **(b)** ;
B. Classification des réseaux de chenaux de marée : dendritique méandriforme.

Figure 3.9. *Classification of salt marshes and their tidal creeks (from Pye and French, 1993a)* *118*
A. *Geomorphologic classification of salt marshes: fringing* ***(a)*** *and back barrier* ***(b)*** *marshes;*
B. *Classification of tidal creek networks: dendritic meandering.*

Figure 3.10. Estrans en Authie 119
A. Estran silto-sableux en amont de la flèche interne ; **B.** Vasière et butte de spartine ; **C.** Plage du musoir.

Figure 3.10. *Authie tidal flats* *119*
A. *Silt to sandy tidal flat upstream of the inner sand spit;* ***B.*** *Mudflat and Spartina patches;* ***C.*** *"Musoir" sand flat.*

Figure 3.11. Etude de la transition entre deux types d'estrans (Marion *et al*., 2003) 120
A. Envasement (sédiment de taille inférieure à 63 µm) ; **B.** Topographie; **C.** Répartition et densité de quelques espèces macrozoobenthiques.

Figure 3.11. *Study of the transition between two tidal flat types (Marion et al., 2003)* *120*
A. *Silting (grain size above 63 µm);* ***B.*** *Topography;* ***C.*** *Distribution and density of a few macrozoobenthic species.*

Figure 3.12. Granulométrie du profil P1 121
A. Courbes granulométriques représentatives des sédiments rencontrés ; **B.** Localisation des stations ;
C. Indices granulométriques.

Figure 3.12. *Sediment grain size along the profile P1* *121*
A. *Representative grain size curves of sampled sediments;* ***B.*** *Location of stations;*
C. *Grain-size parameters.*

Figure 3.13. Granulométrie des sédiments de vasières. 123

Figure 3.13. *Grain size of mudflats.* *123*

Figure 3.14. Principales espèces zoobenthiques en Authie (estuaire moyen) (web GEMEL) 124
1. *Cerastoderma edule* (coque) ; **2.** *Macoma baltica* ; **3.** *Scrobicularia plana* (scrobiculaire) ; **4.** *Hydrobia ulvae* (hydrobie), **5.** *Hediste diversicolor* ; **6.** *Pygospio elegans* ; **7.** *Corophium arenarium* ; **8.** *Bathyporeia pilosa.*

Figure 3.14. *Main zoobenthic species in the Authie* (inner estuary) *(web GEMEL)* *124*
1. *Cerastoderma edule (cockle);* ***2.*** *Macoma baltica ;* ***3.*** *Scrobicularia plana;* ***4.*** *Hydrobia ulvae;* ***5.*** *Hediste diversicolor;* ***6.*** *Pygospio elegans;* ***7.*** *Corophium arenarium;* ***8.*** *Bathyporeia pilosa.*

Figure 3.15. Modes de progression de *Spartina anglica* : ceinture monospécifique progradant par buttes ou par semis sur la vasière. 125

Figure 3.15. *Spartina anglica progression modes: monospecific belt prograding by patches or by seed propagation on the mudflat.* *125*

Figure 3.16. Communautés végétales plurispécifiques de haut (à gauche) et de moyen schorre (à droite). 126

Figure 3.16. *Plurispecific plant communities of upper (on the left) and mid salt marsh (on the right).* *126*

Figure 3.17. Répartition des espèces végétales selon le niveau d'action des marées et la cote altimétrique. 127

Figure 3.17. *Distribution of plant species according to tidal and topographic levels.* *127*

Figure 3.18. Effet des endiguements sur les habitats intertidaux (d'après French, 1997) 128
A. Etat initial ; **B.** Après construction de la digue.

Figure 3.18. *Effects of embankments on intertidal habitats (from French, 1997)* *128*
A. *Initial state;* ***B.*** *After embankment.*

Figure 3.19. Modèles conceptuels d'évolution des marais salés 129
A. Modèle de French-Stoddart **a.** Jeune marais en situation basse dans la gamme des niveaux moyens d'action des marées avec des chenaux en début de formation par sédimentation différentielle et présentant un profil globalement convexe ; **b.** Profil convexe avec des plates-formes plates à concaves et un réseau de chenaux s'approfondissant par érosion du lit **c.** Marais mature dont le profil est droit avec un réseau bien développé de chenaux bordés de levées et des plates-formes concaves.
B. Modèle de Pethick-Steel-Pye **a.** Estran dépourvu de végétation avec des lignes de drainage ; **b.** Jeune marais avec un patron simple de chenaux hérités de l'estran ; **c.** Marais bien développé avec un réseau de chenaux très dense et complexe ; **d.** Marais mature montrant une augmentation de la sinuosité des chenaux avec l'abandon de certains drains ainsi que le développement de terrasses internes.

Figure 3.19. *Conceptual models of salt marshes evolution* *129*
A. *French-Stoddart model* ***a.*** *Marsh in early youth low in the tidal frame showing low density of tidal creeks and with a global convex shape of the profile;* ***b.*** *Convex profile with platform elements flat to concave-up with high density of channels deepening by erosion at the channel floor;* ***c.*** *Mature marsh horizontal overall with concave-up platform elements and high density of well developed, leveed creeks.*
B. *Pethick-Steel-Pye model* ***a.*** *Tidal flat with simple, low density drainage network ;* ***b.*** *Youthful marsh low in the tidal frame with simple creek pattern inherited from tidal flat;* ***c.*** *Well developed marsh with*

*very extensive, complex, high density tidal creek network; **d.** Mature marsh with creeks suffering abandonment, the development of internal terraces and the increasing of sinuosity.*

Figure 3.20. Granulométrie du profil P4 130
A. Courbes granulométriques représentatives du sédiment rencontré ; **C.** Localisation des stations ; **B.** Indices granulométriques.

***Figure 3.20.** Grain-size along profile P4* *130*
***A.** Representative grain size curves of sampled sediments; **B.** Location of stations; **C.** Grain-size parameters.*

Figure 3.21. Microtopographie des marais selon le type de végétation 131
A. Spartine (Station P4_3) ; **B.** Obione (Station P4_5) ; **C.** Puccinellie (Station P2_5).

***Figure 3.21.** Microtopography of salt marshes depending on vegetation type* *131*
***A.** Spartina (Station P4_3) ; **B.** Halimione (Station P4_5) ; **C.** Puccinellia (Station P2_5).*

Figure 3.22. Quelques aspects morphologiques des berges de chenaux 133
A. Terrasses dans un chenal secondaire ; **B.** Détail d'un méandre présentant une berge convexe en accrétion et berge concave en érosion (microfalaise) ainsi que deux barres de méandre ; **C.** Microfalaise d'érosion ; **D.** Le réseau racinaire de la végétation consolide les berges ; **E.** Eboulement de blocs ; **F.** Morphologie en escalier due aux attaques érosives lors de différents niveaux de marée ; **G.** Stabilisation des berges par de l'Obione ; **H.** Stabilisation par un tapis d'algue verte ; **I.** Stabilisation artificielle par fascinage.

***Figure 3.22.** Few morphological aspects of channel banks* *133*
***A.** Terraces in a secondary channel; **B.** Detail of a channel meander presenting one concave bank in accretion and one concave bank in erosion (microcliff), and two pint bars; **C.** Erosive microcliff ; **D.** Plant roots network and bank consolidation; **E.** Bloc eroded; **F.** "Steps" due to different tide levels erosion ; **G.** Stabilization of bank by Halimione ; **H.** Stabilization by algae; **I.** Artificial stabilization.*

Figure 3.23. Chenaux de marée observés en Authie 134
A. Vue aérienne oblique du réseau de chenaux en rive Sud de l'estuaire (photo : D. Malengros); **B.** Tête d'un chenal ; **C.** Sinuosité du réseau de chenaux sur un marais mature (photo : A. Trentesaux); **D.** Chenal d'ordre supérieur; **E.** Embranchement entre deux chenaux ; **F.** Chenal d'ordre intermédiaire ; **G.** Chenal d'ordre inférieur avec ses levées.

***Figure 3.23.** Tidal creeks in the Authie* *134*
***A.** Oblique aerial view of the creek network in southern bank of the estuary (picture : D. Malengros); **B.** Creek head; **C.** Sinuosity of creek network on a mature marsh (picture: A. Trentesaux); **D.** High order creek; **E.** Division between two creeks; **F.** Intermediate order creek; **G.** Low order creek with its levees.*

Figure 3.24. Carte des sites de mesure. 135

***Figure 3.24.** Location of measurements sites.* *135*

Figure 3.25. Paramètres de houle mesurés lors de la campagne de mai 2005. 137

***Figure 3.25.** Wave parameters measured during the May 2005 field experiment.* *137*

Figure 3.26. Volume des prismes sédimentaire et tidal (calculé et estimé) pour trois niveaux de marée selon différentes sections d'1 m. 139

Figure 3.26. *Sediment and tidal prism volumes (calculated and estimated) for three tide levels according to different 1 m sections.* *139*

Figure 3.27. Paramètres des courants mesurés sur trois sites lors de la marée 1 (10/02/2005 AM, coefficient 108, marnage 9,32 m). 141

Figure 3.27. *Measured current parameters at three sites over tide 1 (10/02/2005 AM, tidal range 9.32 m).* *141*

Figure 3.28. Paramètres des courants mesurés sur trois sites lors de la marée 9 (14/02/2005 PM, coefficient 69, marnage 7,45 m). 142

Figure 3.28. *Measured* ***current parameters at*** *three sites over tide 9 (14/02/2005 PM, tidal range 7.45 m).* *142*

Figure 3.29. Paramètres des courants mesurés sur trois sites lors de la marée 12 (16/02/2005 AM, coefficient 44, marnage 5,78 m). 143

Figure 3.29. *Measured* ***current*** *parameters* ***at*** *three sites over tide 12 (16/02/2005, tidal range 5.78 m).* *143*

Figure 3.30. Hauteur d'eau et composante axiale des courants de marée pour les stations S4-1 (à gauche) et S4-2 (à droite) sur une partie du cycle semi-lunaire. 145

Figure 3.30. *Water level and axial component of tidal currents for station S4-1 (on the right) and S4-2 (on the right) over a part of a semi-lunar cycle.* *145*

Figure 3.31. Paramètres des courants mesurés sur la partie supérieure de l'estran à la transition entre les stocks vaseux et sableux lors de deux marées (28/04/2002 PM, coefficient 110, marnage 9,42 m ; 25/04/2002 AM, coefficient 80, marnage 7,71 m). 147

Figure 3.31. *Measured current parameters in the upper part of the tidal flat at the transition between sand and mud for two tides (28/04/2002 PM, tidal range 9.42 m; 25/04/2002 AM, tidal range 7.71 m).* *147*

Figure 3.32. Grille d'échantillonnage des sédiments et résultats obtenu avec GSST Analyse. 148

Figure 3.32. *Sediment sampling grid and results from GSST Analysis.* *148*

Figure 3.33. Interactions entre la morphologie et l'asymétrie tidale (Wang *et al*., 2002). 150

Figure 3.33. *Interactions between morphology and tidal asymmetry (Wang et al., 2002).* *150*

CHAPITRE IV :
ETUDES HYDROSEDIMENTAIRES A L'ECHELLE DE LA MAREE

Figure 4.1. Co-déploiement et acquisitions multi-paramétriques. 152

Figure 4.1. *Co-deployment and multi-parametric acquisitions.* *152*

Figure 4.2. Salinité et concentration en MES mesurées dans le chenal principal de l'Authie sur le site de la Madelon (référence) pendant une marée de mortes eaux (marée du 21/05/2003, coefficient 64, marnage = 6,38 m) et de vives-eaux (marée du 19/05/2003, coefficient 92, marnage = 8,29 m). 154

Figure 4.2. *Salinity and SPM concentration measured in the main channel of the Authie in la Madelon site (reference) over a neap (21/05/2003, tidal range = 6.38 m) and a spring tide (19/05/2003, tidal range = 8.29 m).* *154*

Figure 4.3. Salinité et concentration en MES mesurées dans le chenal principal de l'Authie sur deux sites simultanément : la Madelon (référence) et Pont à Cailloux (en amont) (05/05/2004, coefficient 104, marnage = 8,92 m). 155

Figure 4.3. *Salinity and SPM concentration measured in the main channel of the Authie simultaneously at two sites: la Madelon (reference) and Pont à Cailloux (upstream) (05/05/2004, tidal range = 8.92 m).* *155*

Figure 4.4. Salinité et concentration en MES mesurées dans un chenal de marée pendant une marée de mortes eaux (marée du 20/05/2003, coefficient 71, marnage = 7,41 m) et de vives-eaux (marée du 17/05/2003, coefficient 105, marnage = 9,12 m). 156

Figure 4.4. *Salinity and SPM concentration measured in a tidal channel over a neap (20/05/2003, tidal range = 7.41 m) and a spring tide (17/05/2003, tidal range = 9.12 m).* *156*

Figure 4.5. Salinité et concentration en MES mesurées dans le chenal principal de l'Authie (la Madelon, référence) et dans un chenal de marée simultanément (07/05/2004, coefficient 100, marnage = 8,88 m). 157

Figure 4.5. *Salinity and SPM concentration measured in the main channel of the Authie (la Madelon, reference) and in a tidal channel simultaneously (07/05/2004, tidal range = 8.88 m).* *157*

Figure 4.6. Comportement des éléments selon l'origine marine ou fluviale dans un estuaire. 159

Figure 4.6. *Behaviour of elements depending on marine or river origin in an estuary.* *159*

Figure 4.7. Concentration de Ca, K, Mg, Sr et SO_4 dissous en fonction de la salinité des eaux filtrées dans l'estuaire de l'Authie. 160

Figure 4.7. *Concentration of dissolved Ca, K, Mg, Sr and SO_4 as a function of salinity in filtered Authie estuary water.* *160*

Figure 4.8. Evolution temporelle de la concentration de Ca, Al et Zr dans la MES en fonction du temps dans un chenal de marée (marée du 20/05/2003, coefficient 78, marnage = 7,83 m) et dans le chenal principal à la Madelon (marée du 19/05/2003, coefficient 92, marnage = 8,63 m). 161

Figure 4.8. *Temporal evolution of Ca, Al and Zr concentrations in SPM in a tidal channel (20/05/2003, coefficient 78, tidal range = 7.83 m) and in the main channel, Madelon site (19/05/2003, tidal range = 8.63 m).* *161*

Figure 4.9. Evolution temporelle de la concentration en COP et NOP dans la MES dans un chenal de marée (marée du 20/05/2003, coefficient 78, marnage = 7,83 m) et dans le chenal principal à la Madelon lors de deux marées d'amplitudes différentes (marée du 19/05/2003, coefficient 92, marnage = 8,63 m ; marée du 21/05/2003, coefficient 64, marnage = 6,8 m). 164

Figure 4.9. *Temporal evolution of Ca, Al and Zr concentrations in SPM in a tidal channel (20/05/2003 tide, coefficient 78, tidal range = 7.83 m) and in the main channel at Madelon site for two different tidal amplitudes (19/05/2003, tidal range = 8.63 m; 21/05/2003, tidal range = 6.8 m).* *164*

Figure 4.10. Evolution temporelle de la teneur en COP en fonction de la MES totale et du rapport COP/NOP dans chenal de marée (marée du 20/05/2003, coefficient 78, marnage = 7,83 m) et dans le chenal principal à la Madelon lors de deux marées d'amplitudes différentes (marée du 19/05/2003, coefficient 92, marnage = 8,63 m ; marée du 21/05/2003, coefficient 64, marnage = 6,8 m). 166

Figure 4.10. *Temporal evolution of COP as a function of total SPM and COP/NOP ratio in a tidal channel (20/05/2003 tide, coefficient 78, tidal range = 7.83 m) and in the main channel at Madelon site for two different tidal amplitudes (19/05/2003, tidal range = 8.63 m; 21/05/2003, tidal range = 6.8 m).* *166*

Figure 4.11. Enregistrement courantométrique (ADV, A et B) et des MES (LISST et ASM, C et D) dans le chenal principal (marée du 10/05/2004, coefficient 56, marnage 5,55 m). 168

Figure 4.11. *Records of tidal currents (ADV, A and B) and SPM (LISST and ASM, C and D) in the main channel (10/05/2004, tidal range = 5.55 m).* *168*

Figure 4.12. Enregistrements des courants de marée (ADV, A et B) et des MES (LISST et ASM, C et D) dans un chenal de marée sans débordement (marée du 10/05/2004, coefficient 63, marnage 6,15 m). 169

Figure 4.12. *Records of tidal currents (ADV, A and B) and SPM (LISST and ASM, C and D) in a tidal channel without over-bank flooding (10/05/2004, tidal range = 6.15 m).* *169*

Figure 4.13. Enregistrement courantométrique (ADV, A et B) et des MES (LISST et ASM, C et D) dans un chenal de marée avec débordement (marée du 07/05/2004, coefficient 100, marnage 9,03 m). 171

Figure 4.13. *Records of tidal currents (ADV, A and B) and SPM (LISST and ASM, C and D) in an overflooding tidal channel (07/05/2004, tidal range = 9.03 m).* *171*

Figure 4.14. Enregistrement courantométrique (ADV, A et B) et des MES (LISST et ASM, C et D) sur un schorre avec microfalaise d'érosion (marée du 06/05/2004, coefficient 105, marnage 9,11 m). 172

Figure 4.14. *Records of tidal currents (ADV, A and B) and SPM (LISST and ASM, C and D) in a salt marsh with a microcliff transition (06/05/2004, tidal range = 9.11 m).* *172*

Figure 4.15. Enregistrement courantométrique (ADV, A et B) et des MES (LISST et ASM, C et D) sur un schorre progradant (marée du 07/05/2004, coefficient 103, marnage 9,09 m). 174

Figure 4.15. *Records of tidal currents (ADV, A and B) and SPM (LISST and ASM, C and D) in a salt marsh with a progrational transition (07/05/2004, tidal range = 9.09 m).* *174*

Figure 4.16. Enregistrement courantométrique (ADV, A et B) et des MES (LISST et ASM, C et D) sur la vasière (marée du 09/05/2004, coefficient 77, marnage 7,05 m). 175

Figure 4.16. *Records of tidal currents (ADV, A and B) and SPM (LISST and ASM, C and D) over the mudflat (09/05/2004, tidal range = 7.05 m).* *175*

Figure 4.17. Flux de MES en fonction du temps pour les six marées étudiées. 177

Figure 4.17. *SPM fluxes as a function of time for the six studied tides.* *177*

Figure 4.18. Concentration en MES en fonction de la vitesse du courant pour les six marées étudiées. 178

Figure 4.18. *SPM concentration as a function of mean current velocity for the six studied tides.* *178*

Figure 4.19. Enregistrements courantométriques et des flux de MES sur la vasière principale, à l'intérieur et sur la limite externe (13 au 24/05/2003). 179

Figure 4.19. *Records of tidal currents and SPM fluxes over the main mudflat (*13 to 24/05/2003*).* *179*

Figure 4.20. Profils de concentration de MES par marée sur un cycle semi-lunaire au centre de la vasière principale (A) et en bordure externe (E) : marée 2, 3 et 5. 181

Figure 4.20. *SPM concentration profiles by tide over a semi-lunar cycle in mudflat center (A) and in the external border (E): tide 2, 3 and 15.* *181*

CHAPITRE V :

SUIVI SEDIMENTAIRE DU CYCLE SEMI-LUNAIRE A L'ECHELLE ANNUELLE

Figure 5.1. Localisation des stations de suivi. 184

Figure 5.1. *Location of surveyed stations.* *184*

Figure 5.2. Calibration du ESST dans un canal de mesure (University of East Anglia) et effet de différentes vitesses d'écoulement sur le dispositif. 185

Figure 5.2. *ESST calibration using a re-circulating flume (University of East Anglia) and effects of different flow velocities on the frame.* *185*

Figure 5.3. Lamines observées dans le sédiment récolté par le cylindre du ESST sur les trois stations pendant un cycle semi-lunaire d'avril 2004. 186

Figure 5.3. *Laminations observed in collected sediment by ESST chamber for the three stations during one April 2004's semi-lunar cycle.* *186*

Figure 5.4. Sédiment récolté sur chaque station par cycles observés sur un an. 187

Figure 5.4. *Collected sediment at each station for observed cycles during one year.* *187*

Figure 5.5. Hydropériode théorique moyenne par station. 188

Figure 5.5. *Averaged theoretical hydroperiod at each station.* *188*

Figure 5.6. Comparaison des résultats par addition des marées (sur le cycle complet et les deux demi-cycles montant et descendant) et des résultats totaux sur le même cycle semi-lunaire. 190

Figure 5.6. *Comparison of data with cumulative tides (over the complete cycle and on the two semi-cycles,* neap to spring tide and spring to neap tides*) and of total data over the same semi-lunar cycle.* *190*

Figure 5.7. Taux de sédimentation annuel observé par station. 191

Figure 5.7. *Annual sedimentation rates observed at each station.* *191*

Figure 5.8. Taux de sédimentation moyen observé par station par cycle semi-lunaire. 191

Figure 5.8. *Averaged sedimentation rate observed at each station over a semi-lunar cycle.* *191*

Figure 5.9. Taux de sédimentation observés sur les stations pendant quatre cycles semi-lunaires consécutifs. 193

Figure 5.9. *Sedimentation rates observed at the stations over four consecutive semi-lunar cycles.* *193*

Figure 5.10. Corrélations observées entre la quantité de sédiment déposé (VAR3) et l'élévation d'une part (VAR1) et la végétation en place d'autre part (VAR2) pour chaque cycle semi-lunaire sur une année. 194

Figure 5.10. *Correlations observed between deposited sediment (VAR3), and elevation on one hand (VAR1) and vegetation types on the other (VAR2) for each semi-lunar cycle during one year.* *194*

Figure 5.11. Enregistrement quasi-continu de la sédimentation sur la vasière pendant deux ans (du 01/11/02 au 23/01/04). 196

Figure 5.11. *Quasi-continuous sedimentation record on a mudflat over two years (from 01/11/02 to 23/01/04).* *196*

Figure 5.12. Sédimentation de la vasière au cours d'un cycle lunaire. 196

Figure 5.12. *Mudflat sedimentation during a lunar cycle.* 196

Figure 5.13. Relation entre épaisseur des dépôts et marnage. 197

Figure 5.13. *Relation between deposition thickness and tidal range.* *197*

Figure 5.14. Changements d'élévation sur trois stations du schorre. 198

Figure 5.14. *Elevation changes on three salt marshes stations.* *198*

Figure 5.15. Comparaison des variations d'altitude entre des zones à spartine et des zones dépourvues de spartine, estuaire Humber (Gray *et al*., 1997). 199

Figure 5.15. *Comparison of elevation changes between Spartina areas and bare sediment, Humber estuary (Gray et al., 1997).* *199*

Figure 5.16. Accrétion sur un cycle lunaire et ses composantes pour deux stations, avec (B2) et sans (B1) spartine. 200

Figure 5.16. A*ccretion over a lunar cycle and its components* for station with (B2) and without (B1) *Spartina.* *200*

Figure 5.17. Suivi topographique des profils P1, P2 et P3. 202

Figure 5.17. *Elevation survey of profiles P1, P2 and P3.* *202*

Figure 5.18. Suivi du profil P4 et zoom sur l'évolution morphologique de trois chenaux d'ordre différents. 204

Figure 5.18. *Elevation survey of profile P4 and close-up view of the morphological evolution of three channels of different stream orders.* *204*

CHAPITRE VI :

PLACE DE LA SEDIMENTATION FINE DANS LE CONTEXTE DE REMPLISSAGE GENERAL ET D'EVOLUTION À MOYEN TERME

Figure 6.1. Structure des rythmites tidales en fonction des variations de vitesse du courant au cours d'un cycle tidal (d'après Dalrymple, 1992). 208

Figure 6.1. *Structure of tidalite as a function of current speed variations during a tidal cycle (from Dalrymple, 1992).* *208*

Figure 6.2. Types de stratifications tidales (d'après Reineck et Wunderlich, 1968) avec une partie inférieure **(I)** pour chaque bloc diagramme correspondant à des rides d'oscillation et une partie supérieure **(II)** correspondant à des rides de courant à crêtes rectilignes **(a)** ou courbes **(b)**. 209

Figure 6.2. *Tidal stratifications types (from Reineck and Wunderlich, 1968) with an inferior part **(I)** for each diagram bloc corresponding to oscillation ripples and an upper part **(II)** corresponding to currant ripples with linear **(a)** or curved crests **(b)**.* *209*

Figure 6.3. Bloc diagramme d'un estran tidal montrant ses subdivisions (subtidal, intertidal et supratidal) avec les figures sédimentaires caractéristiques (d'après Dalrymple, 1992). 210

Figure 6.3. *Schematic morphology, terminology (subtidal, intertidal and supratidal) and internal structure of a typical tidal flat (from Dalrymple, 1992).* *210*

Figure 6.4. Lithologie 212
A. Photographie d'un sondage et colonnes lithologiques reconstituées à partir des observations du sédiment (**a.** Colonne lithologique détaillée ; **b.** Colonne lithologique simplifiée)
B. Faciès identifiés et caractéristiques : **1.** Supratidal - terre végétale ; **2.** Intertidal supérieur - schorre (vase, présence de racines, forte oxydation) ; **3.** Intertidal supérieur – haute slikke (argiles, présence de tidalites) ; **4.** Intertidal moyen – (prédominance de silts ; présence d'argiles en litages grossiers et de sables fins) ; **5.** Intertidal moyen à inférieur (sables fins à moyens, coquilles) ; **6.** Contact érosif et chaos avec débris coquilliers ; **7.** Traces de bioturbation réalisées par des Annélides ; **8.** Séquence de comblement de chenal (coquilles et blocs d'argile de différentes tailles) ; **9.** Bivalve en position de vie (*Scrobicularia plana*).

Figure 6.4. *Lithology* *212*
A. *Typical core sequence (**a.** Detailed lithology; **b.** Simplified lithology)*
B. *Identified facies and characteristics: **1.** Supratidal - soil; **2.** Upper intertidal - schorre (mud, roots, intense oxidation); **3.** Upper intertidal - upper slikke (clays, tidalites); **4.** Intermediate intertidal – (silts dominated; fine sand and thick clay layers); **5.** Intermediate to low intertidal (fine to medium sands, shells); **6.** Erosive transition and blockfield with shell fragments; **7.** Bioturbation tracks by Annelids; **8.** Infilling channel sequence (shells and different sizes of clay pebbles); **9.** Bivalve in living position (Scrobicularia plana).*

Figure 6.5. Coupe stratigraphique schématique de la séquence holocène le long des côtes de l'Europe du nord ouest (d'après Baeteman *et al.*, 2002). 216

Figure 6.5. *Schematic representation of the Holocene sequence along North-West European coasts (from Baeteman et al., 2002).* *216*

Figure 6.6. Distribution des unités morphologiques et esquisse de l'organisation stratigraphique du prisme de comblement (d'après Dalrymple *et al*., 1992). 217
A. Estuaire dominé par la houle ; **B.** Estuaire dominé par la marée.

Figure 6.6. *Distribution of morphological units and schematic stratigraphy organization of infilling prism (adapted from Dalrymple et al., 1992).* *217*
A. *Wave dominated estuary;* ***B.*** *Tide dominated estuary.*

Figure 6.7. Localisation des sondages et du tracé des coupes réalisées. 218

Figure 6.7. *Location of cores for stratigraphic profile construction.* *218*

Figure 6.8. Coupe longitudinale. 221

Figure 6.8. *W-E section.* *221*

Figure 6.9. Coupes transversales 1 (aval) et 2 (interne). 223

Figure 6.9. *Western (downstream, 1) and central (2) cross sections (numbers refer to Figure 6.7).* *223*

Figure 6.10. Coupe transversale 3 (amont). 225

Figure 6.10. *Eastern (upstream, 3) cross section.* *225*

Figure 6.11. Stratifications entrecroisées (d'après Cojan et Renard, 1999) 226
A. Représentation schématique d'un cas d'accrétion latérale dans un chenal (rive convexe) ;
B. Stratifications en auge : comblement de chenal.

Figure 6.11. *Cross beddings (from Cojan and Renard, 1999)* *226*
A. *Cross profile of a point bar in a channel (convex side);* ***B.*** *Trough crossbeddings: channel infilling.*

Figure 6.12. Localisation des paléochenaux étudiés et topographie. 227

Figure 6.12. *Location of studied palaeochannels and topography.* *227*

Figure 6.13. Coupes transversales sur un réseau de paléochenaux 228
A. Comblement d'un chenal secondaire ;
B. Comblement d'un chenal d'ordre plus important et remblai.

Figure 6.13. *Cross-shore sequence of a palaeochannels network* *228*
A. *Infilling of a secondary channel;*
B. *Infilling of an upper stream channel and reclamation fill.*

Figure 6.14. Profil géoradar d'une section de paléochenal. 230

Figure 6.14. *Ground-penetrating radar profile across a palaeochannel.* *230*

Figure 6.15. Profil sismique transversal du chenal de l'Authie. 231

Figure 6.15. *Seismic profile across the Authie channel.* *231*

Figure 6.16. Localisation des sondages datés. 232

Figure 6.16. *Location of dated cores.* *232*

Figure 6.17. Activités mesurées du ^{137}Cs, ^{60}Co et ^{241}Am en fonction de la profondeur pour le sondage 7. 233

Figure 6.17. *Measured activities of ^{137}Cs, ^{60}Co and ^{241}Am as a function of depth for core 7.* *233*

Figure 6.18. Mesures d'activités du ^{210}Pbxs en fonction de la profondeur pour le sondage 7. 234

Figure 6.18. *Measured activities of ^{210}Pbxs as a function of depth for core 7.* *234*

Figure 6.19. Spectres de Fourier calculés par le logiciel Analyseries 0.1. 235

Figure 6.19. *Fourier spectra calculated with Analyseries 0.1 software.* *235*

Figure 6.20. Activités mesurées du ^{137}Cs, ^{60}Co et ^{241}Am en fonction de la profondeur pour le sondage 34. 237

Figure 6.20. *Measured activities of ^{137}Cs, ^{60}Co and ^{241}Am as a function of depth for core 34.* *237*

Figure 6.21. Activités mesurées du ^{210}Pbxs en fonction de la profondeur pour le sondage 34. 237

Figure 6.21. *Measured activities of ^{210}Pbxs as a function of depth for core 34.* *237*

Figure 6.22. Activités mesurées du ^{210}Pbxs et du ^{137}Cs en fonction de la profondeur pour le sondage 25. 238

Figure 6.22. *Measured activities of ^{210}Pbxs and ^{137}Cs as a function of depth for core 25.* *238*

Figure 6.23. Mesures d'activités du ^{210}Pbxs et du ^{137}Cs en fonction de la profondeur pour le sondage G. 239

Figure 6.23. *Measured activities of ^{210}Pbxs and ^{137}Cs as a function of depth for core G.* *239*

Figure 6.24. Evolution du trait de côte depuis 1199 réalisée à partir de photographies aériennes et de cartes anciennes (d'après Dobroniak, 2000). 240

Figure 6.24. *Shoreline evolution since 1199 realised with aerial photographs and ancient maps (from Dobroniak, 2000).* *240*

Figure 6.25. Evolution topographique de la flèche sableuse interne. 242

Figure 6.25. *Topographic evolution of the internal sand spit.* *242*

Figure 6.26. Positions de l'axe du chenal de l'Authie au cours du siècle (d'après Dobroniak, 2000). 243

Figure 6.26. *Authie channel axis positions during the last century (from Dobroniak, 2000).* *243*

Figure 6.27. Evolution de la bathymétrie du chenal principal et de l'avant-côte (d'après Dobroniak, 2000). 244

Figure 6.27. *Near-shore and Authie channel bathymetric evolution (from Dobroniak, 2000).* *244*

Figure 6.28. Progression du schorre depuis 1878 réalisées à partir de photographies aériennes et de cartes anciennes (d'après Dobroniak, 2000). 245

Figure 6.28. *Salt marsh progression since 1878 from aerial photographs and ancient maps (from Dobroniak, 2000).* *245*

CHAPITRE VII :

SYNTHESE

Figure 7.1. Représentation schématique des techniques d'études dans leur contexte spatio-temporel. 248

Figure 7.1. *Schematic view of study techniques in their spatio-temporal framework.* *248*

Figure 7.2. Principe de la mesure effectuée par le RSET (d'après Cahoon *et al*., 1995). 251

Figure 7.2. *RSET measurement principle (from Cahoon et al., 1995).* *251*

Figure 7.3. Schématisation des processus de sédimentation fine (en noir) et des principaux forçages (en rouge) en milieu estuarien (modifié de Lesourd, 2000). 254

Figure 7.3. *Schematic representation of fine sediment processes (in black) and main forcing (in red) in estuarine domain (modified from Lesourd, 2000).* *254*

Figure 7.4. Modèle synthétique type Authie d'estuaires macro- à mégatidaux co-dominés par la houle et la marée, adapté des modèles morphodynamiques de *Dalrymple et al. (1992).* *256*

Figure 7.4. *Synthetic model of Authie-type macro- to megatidal estuaries co-dominated by waves and tides, adapted from the morphodynamic models of Dalrymple et al. (1992).* *256*

Figure 7.5. Blocs diagrammes schématisant les phases de sédimentation terminale de la plaine maritime flamande (Mrani, 2006). 258

Figure 7.5. *Simplified block diagrams representing terminal sedimentation stages of the Flemish maritime plain (Mrani, 2006).* *258*

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I :
ASPECTS GENERAUX

Tableau 1.1. Valeurs des paramètres selon les auteurs et le type d'estuaire. 26
Table 1.1. *Values of parameters according to authors and estuary type.* *26*

Tableau 1.2. Propriété de cohésion des matériaux fins (Mehta et Li, 1997). 31
Table 1.2. *Cohesion properties of fine materials (Mehta and Li, 1997).* *31*

Tableau 1.3. Propriétés géométriques et physico-chimiques de quelques argiles (McAnally, 1999). 31
Table 1.3. *Geometric and physico-chemical properties of some clays (McAnally, 1999).* *31*

Tableau 1.4. Evolution du marnage entre Berck et Dunkerque. 45
Table 1.4. *Tidal range evolution between Berck and Dunkerque.* *45*

CHAPITRE II :
APPROCHE METHODOLOGIQUE ET TECHNIQUES D'ETUDE

Tableau 2.1. Classification des sédiments de Udden-Wentworth. 63
Table 2.1. *Udden-Wentworth sediment classification.* *63*

Tableau 2.2. Distance réticulaire des minéraux argileux caractéristiques de l'Authie, essai normal. 67
Table 2.2. *Reticular length of characteristic clay mineral in the Authie, normal assay.* *67*

Tableau 2.3. Niveaux moyens des marées (SHOM). 73
Table 2.3. *Mean levels of tides (SHOM).* *73*

Tableau 2.4. Interprétation simplifiée des directions des courants en fonction de la position des enregistrements. 74
Tableau 2.4. *Simplified interpretation of current directions as a function of the measurement position.* *74*

CHAPITRE VI :

PLACE DE LA SEDIMENTATION FINE DANS LE CONTEXTE DE REMPLISSAGE GENERAL ET D'EVOLUTION À MOYEN TERME

Tableau 6.1. Récapitulatif des pics présents sur les quatre spectres, fréquences et périodes associées. (pas d'échantillonnage = 0,02 cm). 235

Table 6.1. *Synthesis of observed peaks on the four spectra, associated frequencies and periods (sample interval = 0.02 cm).* *235*

Annexe II-1. Paramètres d'acquisition LIDAR (EUROSENSE).

Appendix II-1. *LIDAR measurement parameters (EUROSENSE).*

Angle de divergence	1 mrad=1,2 m au sol
Fréquence de mesure	83000 Hz
Fréquence de balayage	653 Hz / 127 lignes de scan
Angle de balayage	14 degrés (7 degrés de part et d'autres de l'axe)
Largeur de bande	295 m
Distance moyenne entre points (dans l'axe du vol)	0,10 m
Distance moyenne entre points (perpendiculaire à l'axe)	1,73 m
Surface totale	15 km^2
Longueur totale	88 km
Nombre de lignes	16 (15 parallèles, 1 transversale)

Annexe II-2. Bibliothèque des sondages disponibles.

Appendix II-2. *Available cores catalogue.*

		LOCALISATION			
N°	TYPE	E (m)	N (m)	Altitude (m)	Longeur (m)
1	vibro-carottage	545899,902	1296337,78	5,444	
2	vibro-carottage	545704,059	1295931,88	5,236	
3	vibro-carottage	548140,287	1296025,16	5,156	
4	vibro-carottage	548051,589	1296662,56	5,225	
5	vibro-carottage	548008,801	1296734,05		
6	vibro-carottage	547359,419	1296017,32	5,156	
7	vibro-carottage	547253,393	1296691,99	4,62	
8	vibro-carottage	547418,553	1296403	4,93	
9	vibro-carottage	547877,637	1295644,54	4,694	
10	vibro-carottage	545816,728	1295736,06	4,742	
11	vibro-carottage	547361,987	1297685,92	4,812	
12	vibro-carottage	546917,643	1297514,17	3,759	
13	vibro-carottage	548123,632	1296958,51	3,797	
14	vibro-carottage	548221,389	1297053,35	4,573	
15	vibro-carottage	546489,078	1297342,31	3,209	
16	vibro-carottage	549667,365	1295930,25	4,934	
17	vibro-carottage	549678,924	1296949,84	5,05	
18	vibro-carottage	549330,243	1296860,43		
19	vibro-carottage	548775,873	1296550,52		
20	vibro-carottage	549685,933	1296938,65	4,833	4,52
21	vibro-carottage	549656,57	1296968,59	4,689	3,82
22	vibro-carottage	550403,538	1295166,94	5,443	4,04
23	vibro-carottage	548085,029	1296442,23	4,952	3,79
24	vibro-carottage	546077,183	1296669,72	2,86	3,08
25	vibro-carottage	547098,436	1296331,37	4,92	4,17
26	vibro-carottage	546899,859	1297115,73	3,31	3,80
27	vibro-carottage	547772,465	1295279,09	3,968	2,48
28	vibro-carottage	547780,732	1295275,3	3,693	3,68
29	vibro-carottage	547791,37	1295271,49	4,249	3,74
30	vibro-carottage	547773,832	1295297,62	4,238	3,37
31	vibro-carottage	547769,269	1295316,2	2,714	3,62
32	vibro-carottage	547809,498	1295184,17	3,676	3?
33	vibro-carottage	547869,217	1295226,23	3,829	3,45
34	vibro-carottage				1
A	tarière	546793,695	1297564,01	3,716	2
B	tarière	546667,305	1297579,851	3,742	2
C	tarière	547034,847	1297737,617	4,484	2
D	tarière	547078,958	1297847,314	4,857	2
E	tarière	547514,075	1297925,92	5,015	2
F	tarière	547414,212	1297959,204	5,066	2
G	tarière	547412,187	1297471,849	4,335	2
BRGM	Sondage long				

Annexe II-3. Situation des lignes sismiques.

Appendix II-3. *Location of seismic lines.*

		Coordonnées géographiques en Lambert 1	
Ligne	**Direction**	**E (m)**	**N (m)**
1	début	548810,540	1297059,119
	fin	549322,351	1297074,830
2	début	547044,874	1297091,307
	fin	548523,948	1296986,222
3	début	548428,256	1296924,848
	fin	548029,484	1296755,352
4	début	547984,747	1296825,498
	fin	547942,246	1296979,053
5	début	547761,730	1296756,474
	fin	547752,964	1296769,538
6	début	547508,980	1297163,123
	fin	546915,194	1296533,417
7	début	546886,808	1296541,114
	fin	546471,996	1297420,531
8	début	546356,847	1297620,065
	fin	546028,316	1297751,109
9	début	546014,145	1297792,041
	fin	545056,793	1299517,328

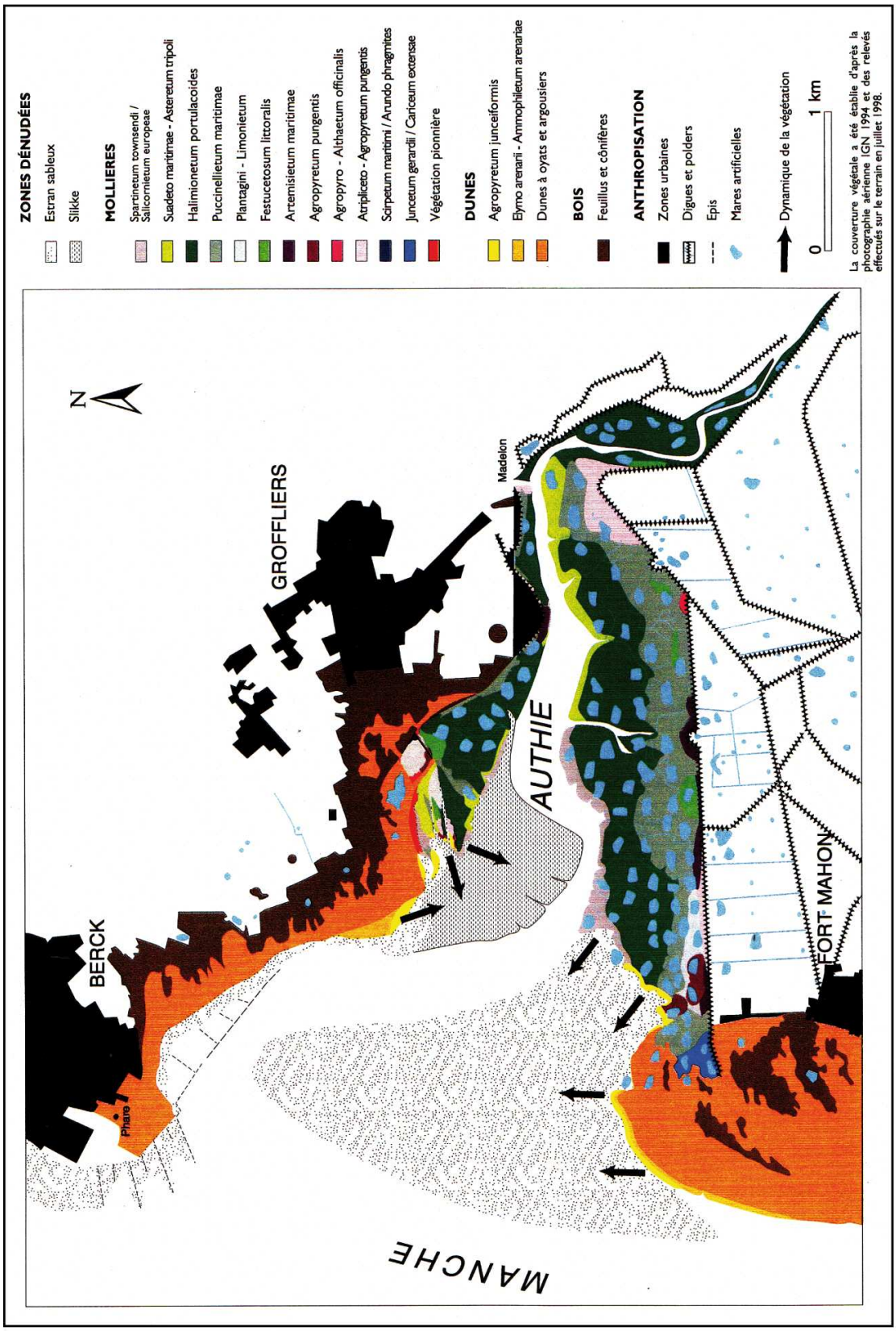
Annexe II-4. Photographies aériennes utilisées lors des différentes études.

Appendix II-4. *Aerial photographs used in different studies.*

Photographies	Echelle	Type	Année	Crédit	Etude(s)		
Référence							
Orthophotoplan	1:25000	C, IR	2000	ENR			
Missions IGN							
CDP 466 N°4933	1:10000	NB	1947	GEMEL			
France 1965 N°145		NB	1965	GéoDAL			
75 FR 2674/250 N°577		NB, IR	1975	GEMEL			
76 FR 2794/145 N°41		NB	1976	GéoDAL			
IFN 02-60-80 N°1025	1:20000	NB, IR	1986	GEMEL			
FD 80 N°2 et 4	1:30000	C	1991	GéoDAL			
FD 59-62 N° 1096, 1283	1:20000	NB	1994	GéoDAL			
FD 60-80 N°151	1:25000	NB	1997	GéoDAL			
FR 5192 N°23, 25	1:15000	C	1997	GéoDAL			
FD 60-80 N°1251	1:25000	C	2002	GéoDAL			
FD 59-62 N°1028, 1030		C	2004	GéoDAL			
NB : Noir et Blanc ; C : Couleur ; IR : Infra Rouge rouge : moyen terme ; bleu : court terme ; jaune : très court terme							

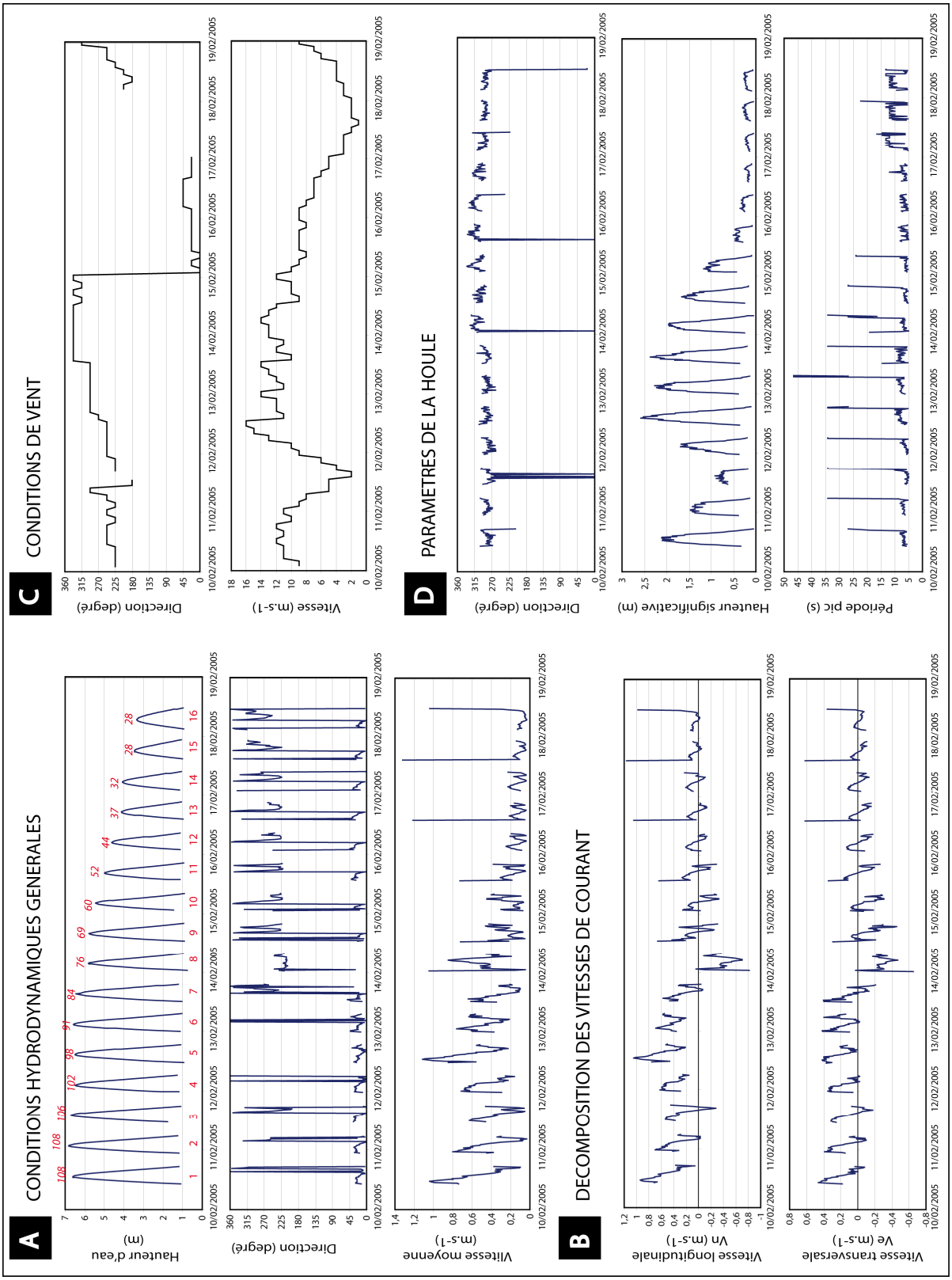
Annexe III-1. Carte de la végétation (Dobroniak, 2000).

Appendix III-1. *Vegetation map (Dobroniak, 2000).*



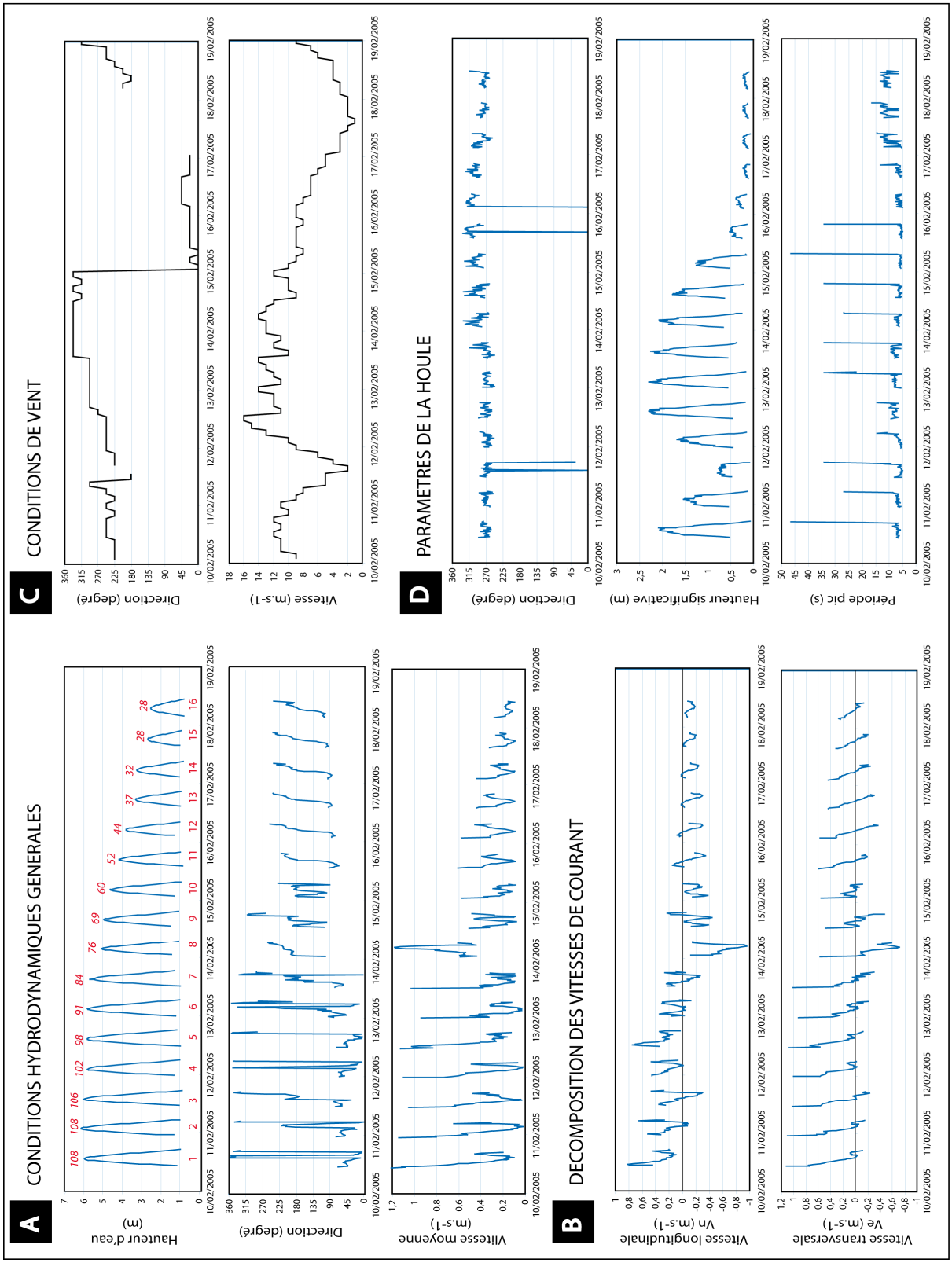
Annexe III-2. Synthèse des enregistrements du courantomètre S4-3 (Campagne Février 2005).

Appendix III-2. *Synthesis of S4-3 current meter measurements (February 2005 campaign).*



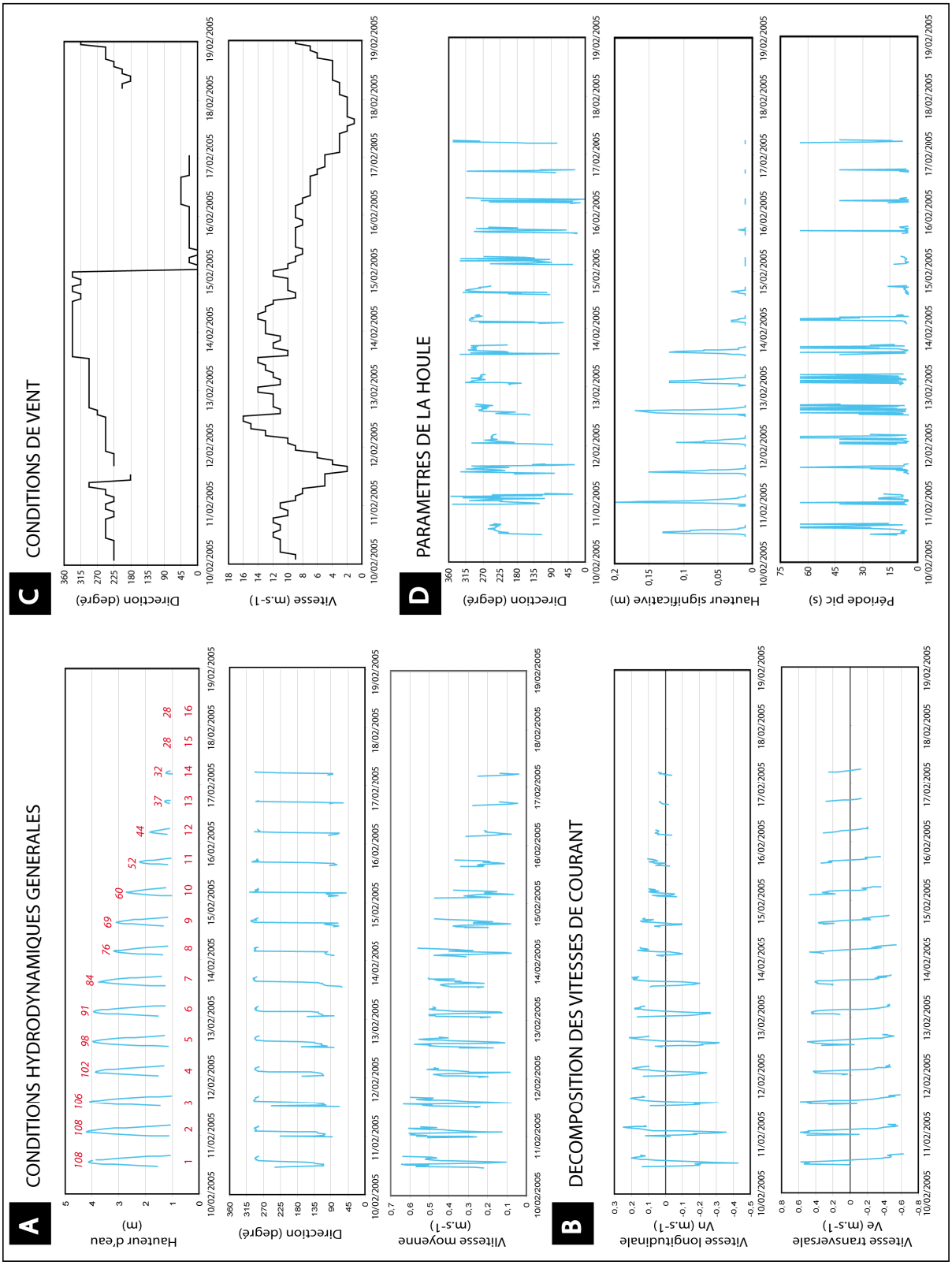
Annexe III-3. Synthèse des enregistrements du courantomètre S4-4 (Campagne Février 2005).

Appendix III-3. *Synthesis of S4-4 current meter measurements (February 2005 campaign).*



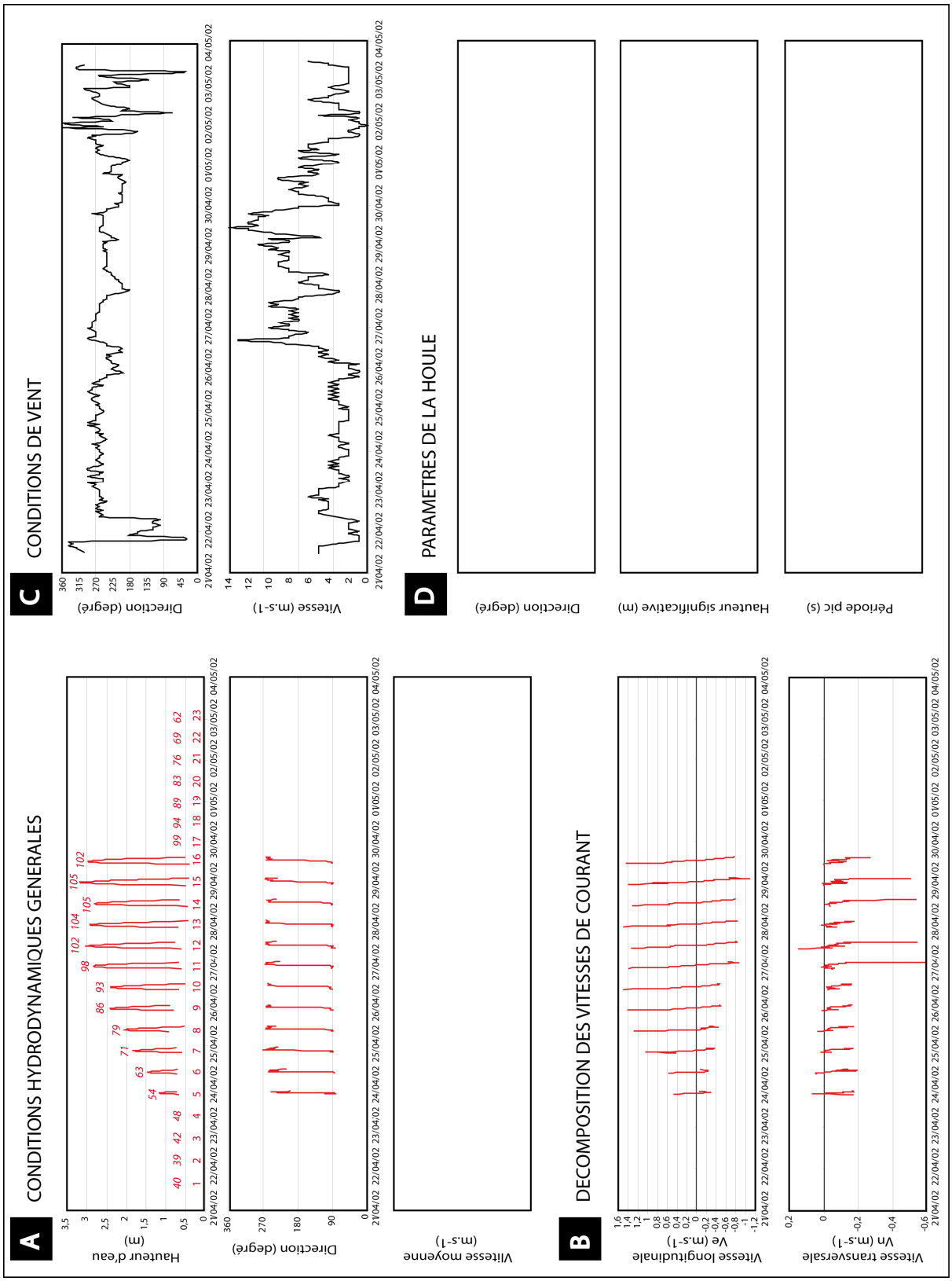
Annexe III-4. Synthèse des enregistrements du courantomètre ADCP-1 (Campagne Février 2005).

Appendix III-4. *Synthesis of ADCP-1 current meter measurements (February 2005 campaign).*



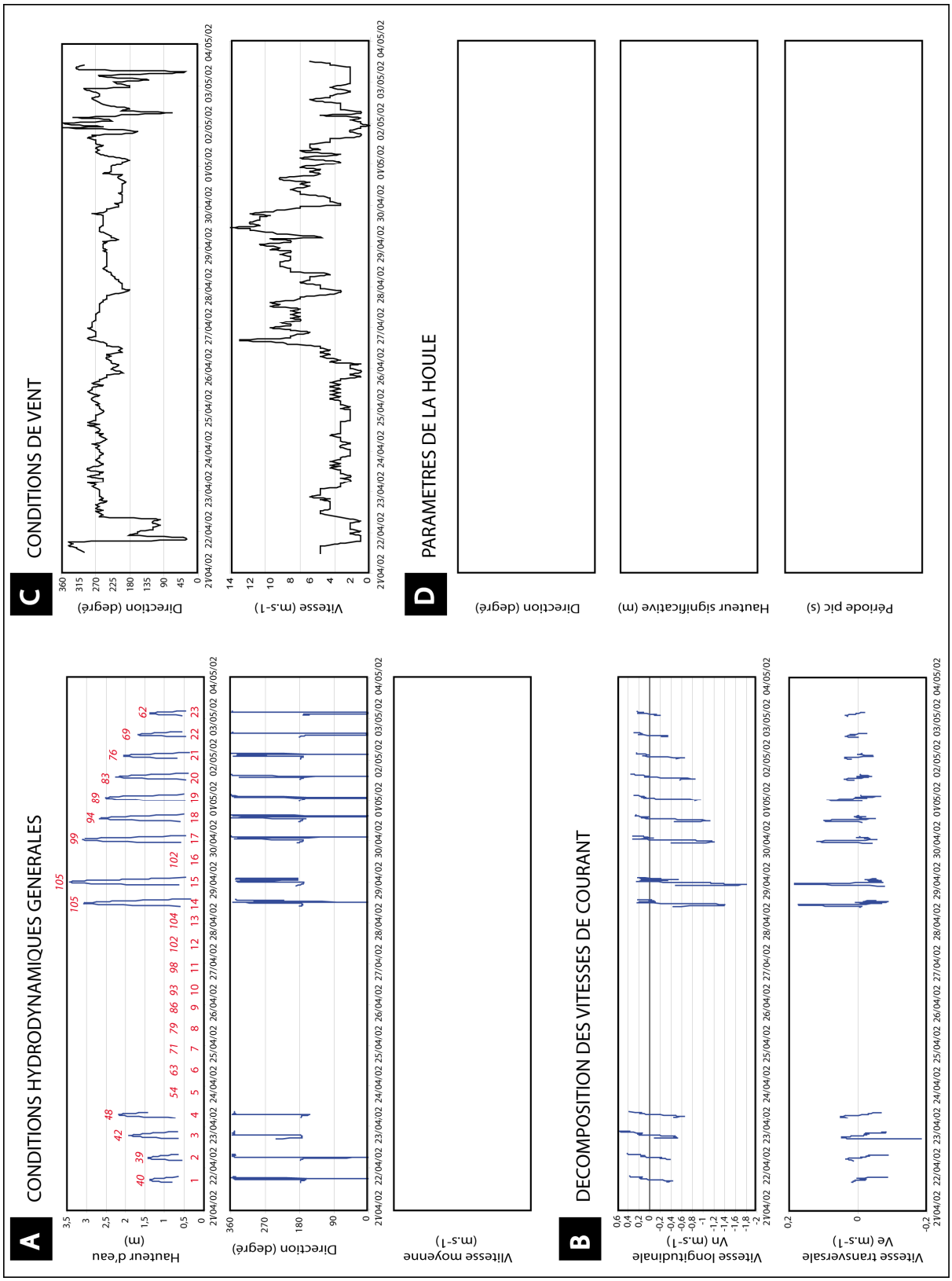
Annexe III-5. Synthèse des enregistrements du courantomètre S4-1 (Campagne Mai 2002).

Appendix III-5. *Synthesis of S4-1 current meter measurements (May 2002 campaign).*



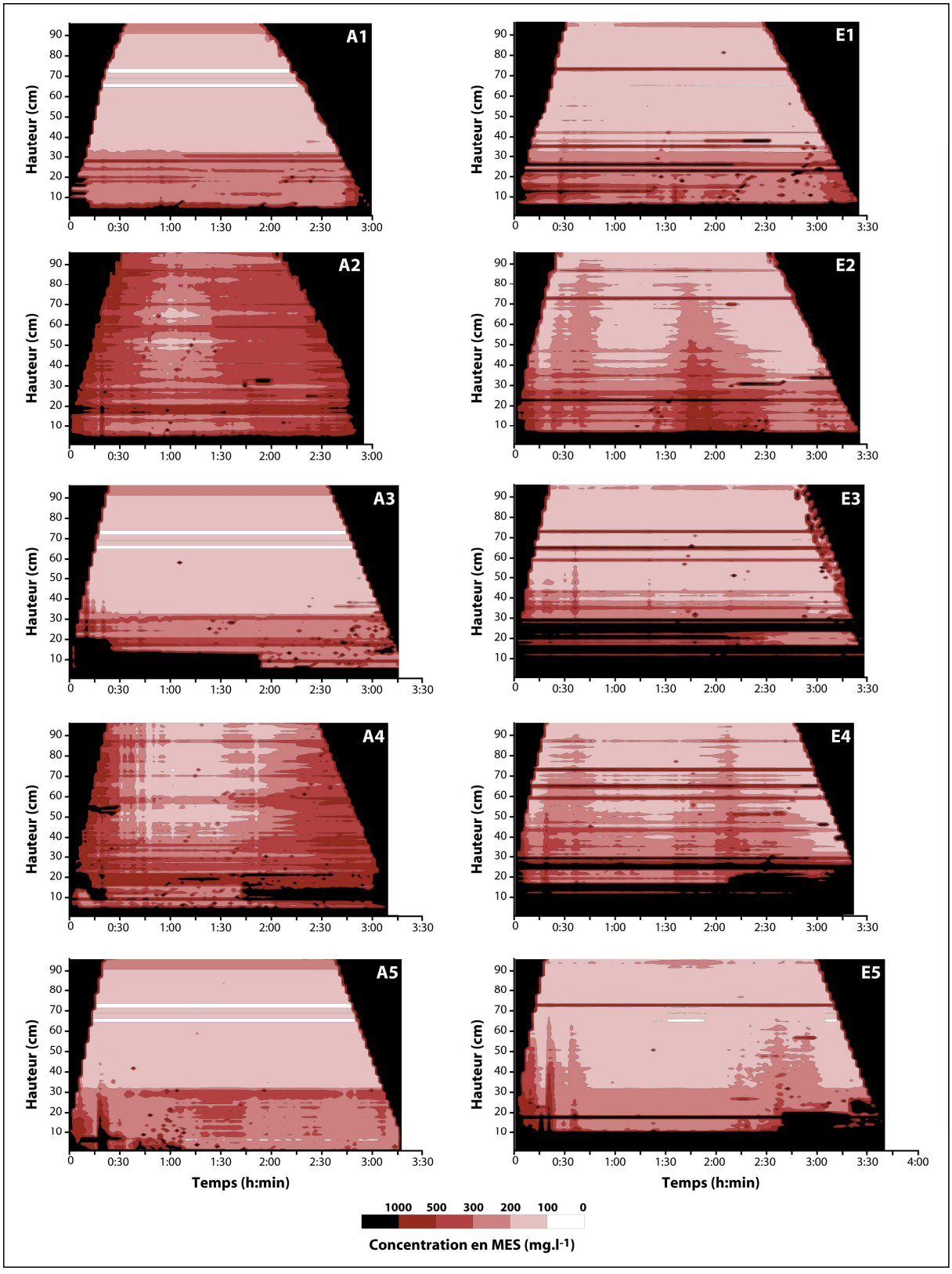
Annexe III-6. Synthèse des enregistrements du courantomètre S4-2 (Campagne Mai 2002).

Appendix III-6. *Synthesis of S4-2 current meter measurements (May 2002 campaign).*



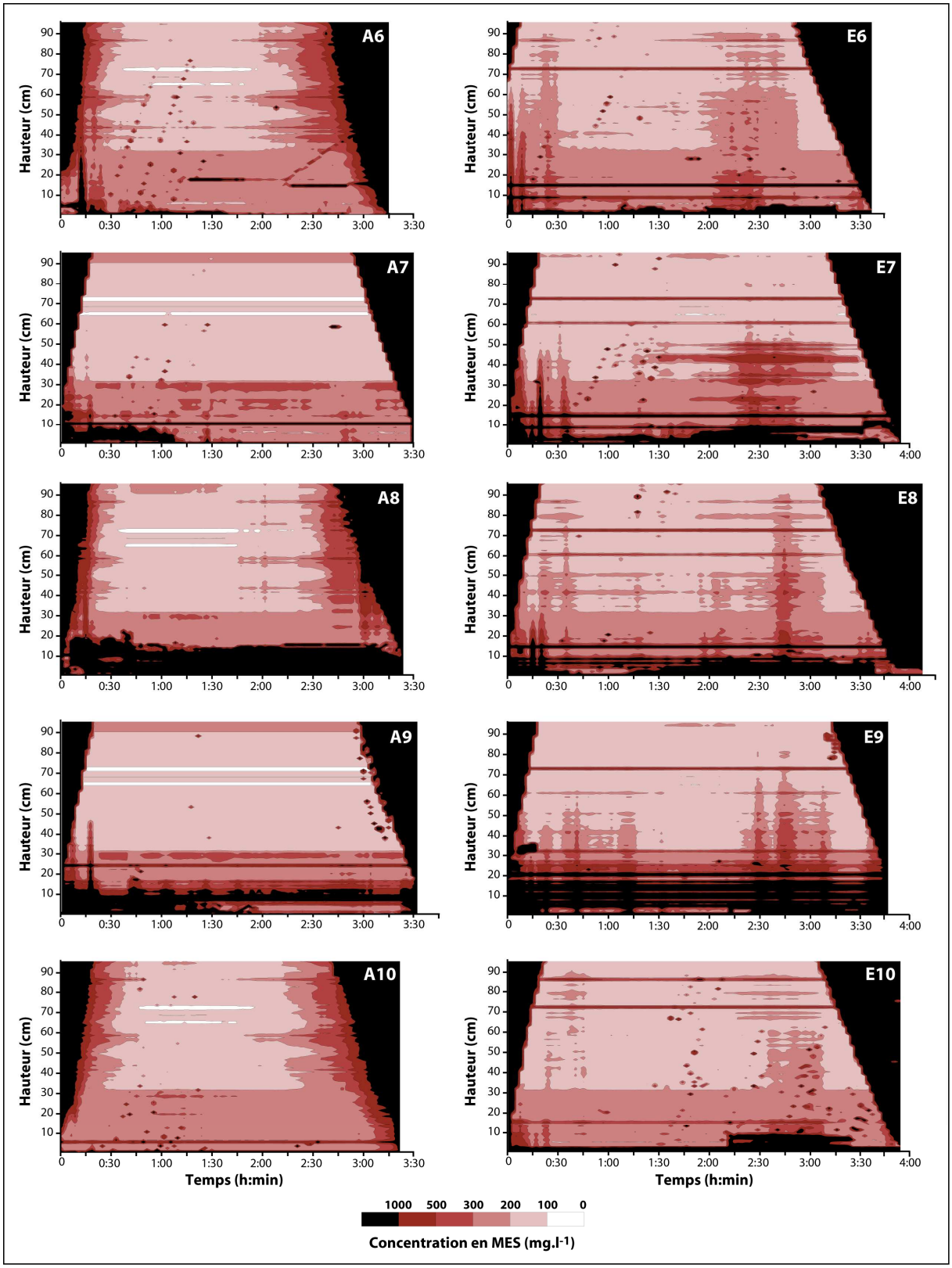
Annexe IV-1. Profils de concentration de MES par marée sur un cycle semi-lunaire au centre de la vasière principale (A) et en bordure externe (E) : marée 1 à 5.

Appendix IV-1. *SPM concentration profiles by tide over a semi-lunar cycle in mudflat center (A) and in the external border (E): tide 1 to 5.*



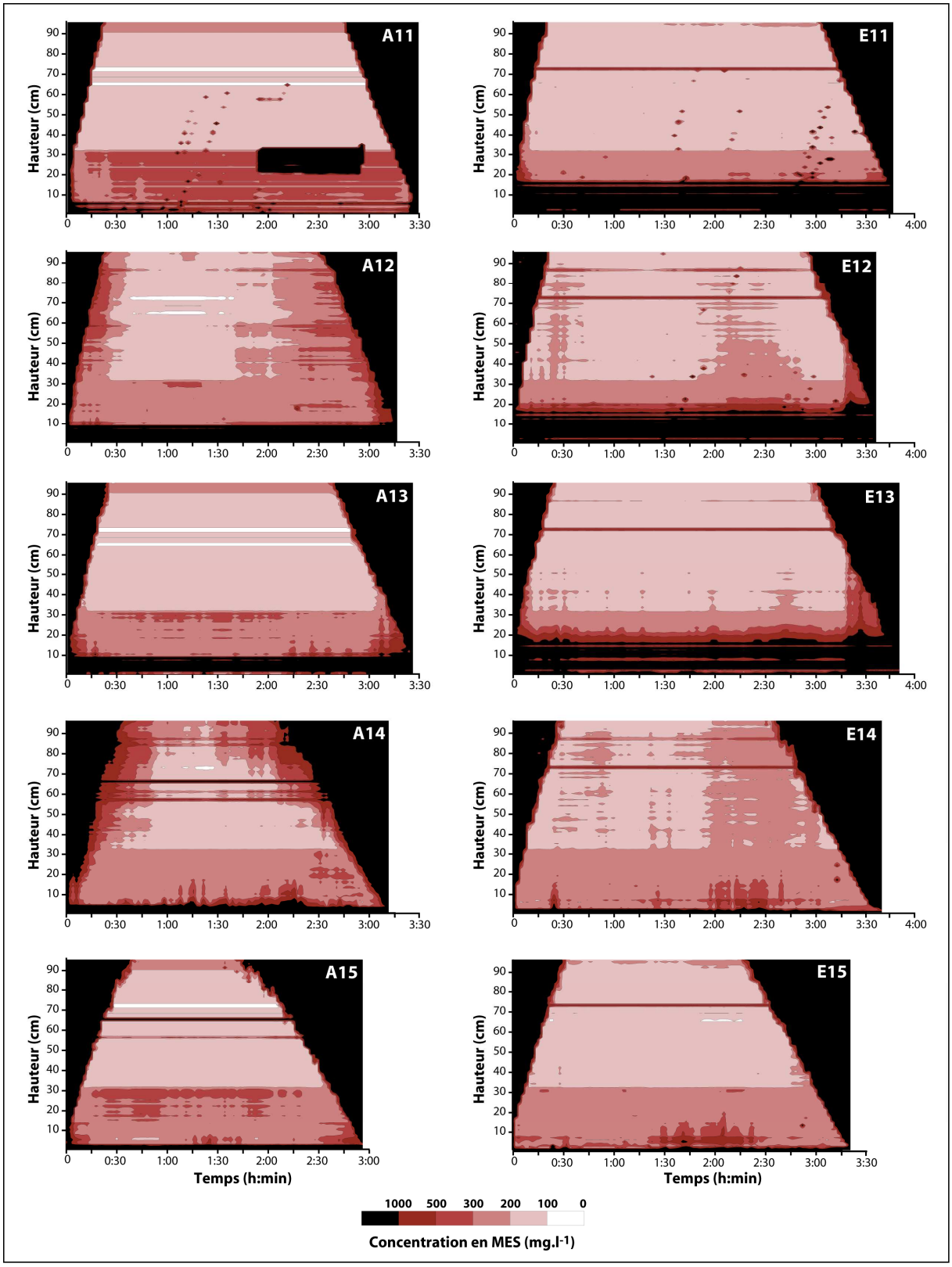
Annexe IV-2. Profils de concentration de MES par marée sur un cycle semi-lunaire au centre de la vasière principale (A) et en bordure externe (E) : marée 6 à 10.

Appendix IV-2. *SPM concentration profiles by tide over a semi-lunar cycle in mudflat center (A) and in the external border (E): tide 6 to 10.*



Annexe IV-3. Profils de concentration de MES par marée sur un cycle semi-lunaire au centre de la vasière principale (A) et en bordure externe (E) : marée 11 à 15.

Appendix IV-3. *SPM concentration profiles by tide over a semi-lunar cycle in mudflat center (A) and in the external border (E): tide 11 to 15.*



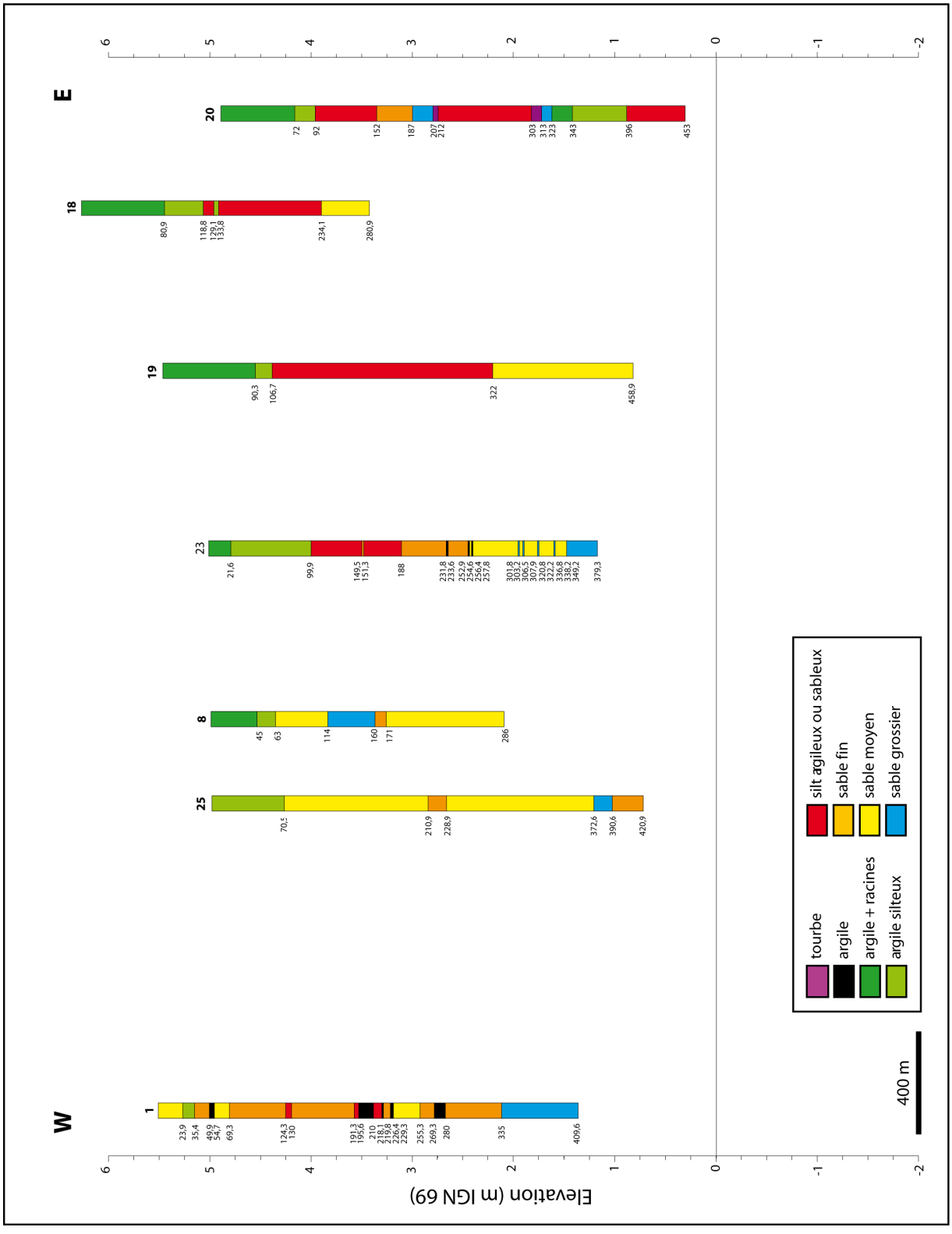
Annexe V-1. Corrélations observées par stations pour les 4 variables suivantes : marnage (var 1), dépôt de sédiment en kg.m^2 (var2), hydropériode en h (var3).

Appendix V-1. *Observed correlations by stations for the 4 following variables: tidal range (var 1), sediment deposition in kg.m^2 (var2), hydroperiod in h (var3).*

STATIONS CH				**STATIONS P2**				**STATIONS P4**			
CH2	var 1	var 2	var 3	**P2-1**	var 1	var 2	var 3	**P4-1**	var 1	var 2	var 3
var 1	1,00	0,69	0,89	var 1	1,00	0,09	0,84	var 1	1,00	0,51	0,84
var 2	0,69	1,00	0,62	var 2	0,09	1,00	-0,20	var 2	0,51	1,00	0,51
var 3	0,89	0,62	1,00	var 3	0,84	-0,20	1,00	var 3	0,84	0,51	1,00
CH3.1	var 1	var 2	var 3	**P2-2**	var 1	var 2	var 3	**P4-2**	var 1	var 2	var 3
var 1	1,00	0,37	0,94	var 1	1,00	0,30	0,86	var 1	1,00	0,31	0,87
var 2	0,37	1,00	0,43	var 2	0,30	1,00	0,28	var 2	0,31	1,00	0,33
var 3	0,94	0,43	1,00	var 3	0,86	0,28	1,00	var 3	0,87	0,33	1,00
CH3.2	var 1	var 2	var 3	**P2-3**	var 1	var 2	var 3	**P4-3**	var 1	var 2	var 3
var 1	1,00	0,39	0,85	var 1	1,00	0,15	0,86	var 1	1,00	0,15	0,91
var 2	0,39	1,00	0,39	var 2	0,15	1,00	0,25	var 2	0,15	1,00	0,11
var 3	0,85	0,39	1,00	var 3	0,86	0,25	1,00	var 3	0,91	0,11	1,00
CH4.1	var 1	var 2	var 3	**P2-4**	var 1	var 2	var 3	**P4-4**	var 1	var 2	var 3
var 1	1,00	0,66	0,90	var 1	1,00	0,10	0,89	var 1	1,00	0,62	0,93
var 2	0,66	1,00	0,65	var 2	0,10	1,00	0,10	var 2	0,62	1,00	0,57
var 3	0,90	0,65	1,00	var 3	0,89	0,10	1,00	var 3	0,93	0,57	1,00
CH4.2	var 1	var 2	var 3	**P2-5**	var 1	var 2	var 3	**P4-5**	var 1	var 2	var 3
var 1	1,00	0,48	0,90	var 1	1,00	0,35	0,88	var 1	1,00	0,72	0,91
var 2	0,48	1,00	0,40	var 2	0,35	1,00	0,26	var 2	0,72	1,00	0,81
var 3	0,90	0,40	1,00	var 3	0,88	0,26	1,00	var 3	0,91	0,81	1,00
CH5	var 1	var 2	var 3	**P2-6**	var 1	var 2	var 3	**P4-6**	var 1	var 2	var 3
var 1	1,00	0,46	0,91	var 1	1,00	0,40	0,82	var 1	1,00	0,71	0,90
var 2	0,46	1,00	0,53	var 2	0,40	1,00	0,35	var 2	0,71	1,00	0,79
var 3	0,91	0,53	1,00	var 3	0,82	0,35	1,00	var 3	0,90	0,79	1,00

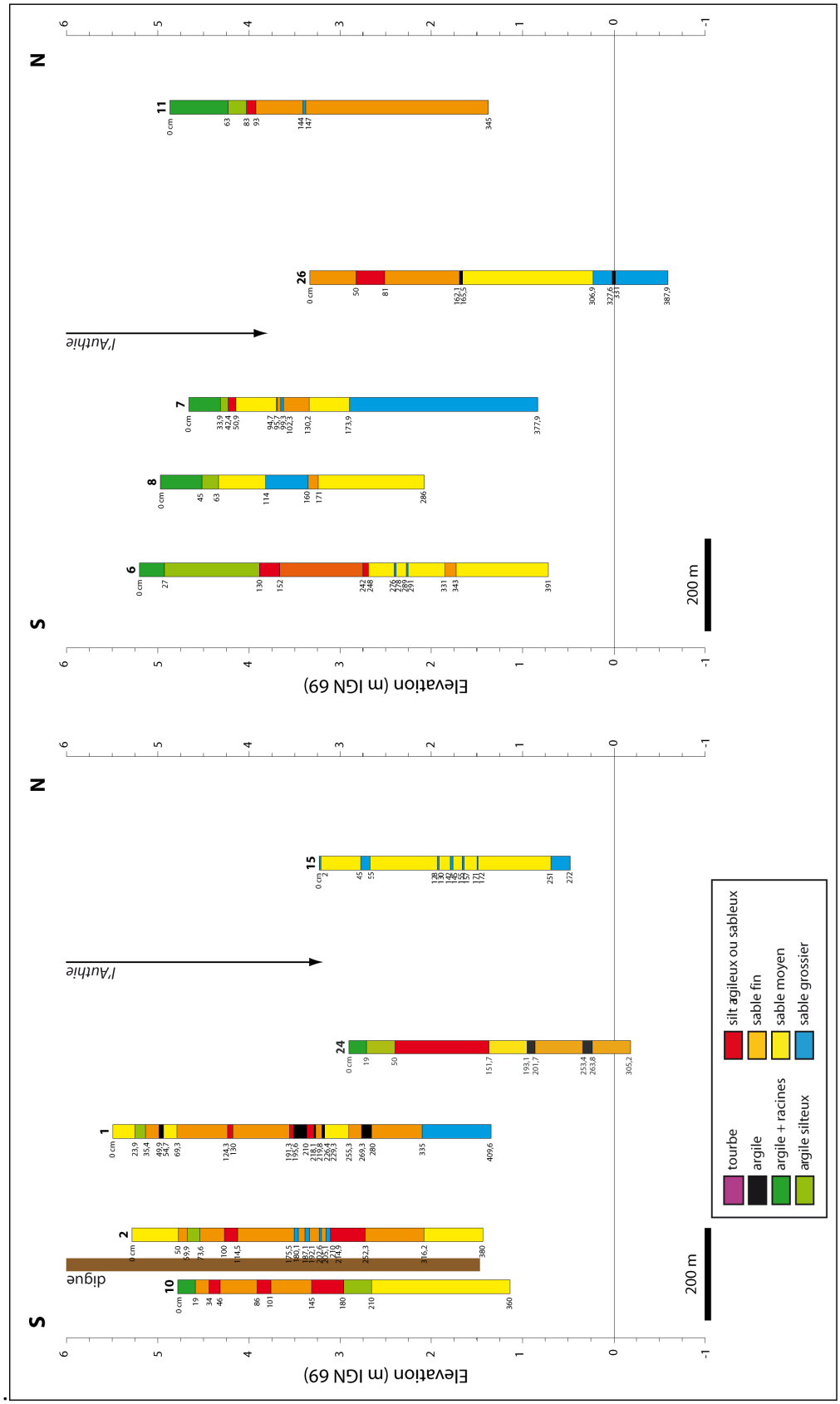
Annexe VI-1. Coupe longitudinale.

Appendix VI-1. *Longshore sequence.*



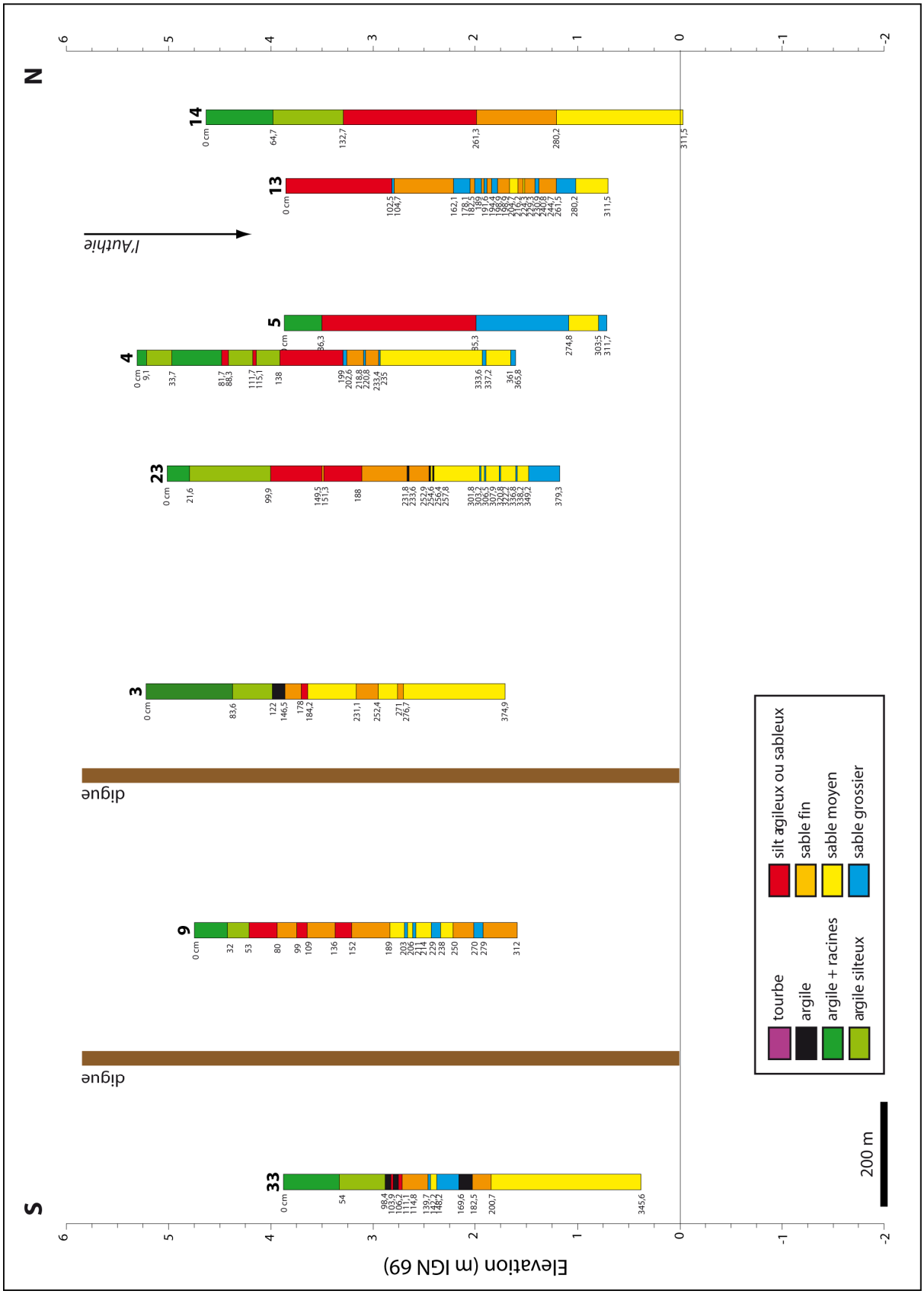
Annexe VI-2. Coupes transversales 1 (aval) et 2 (interne).

Appendix VI-2. *Cross-shore sequences 1 (downstream) and 2 (internal)*



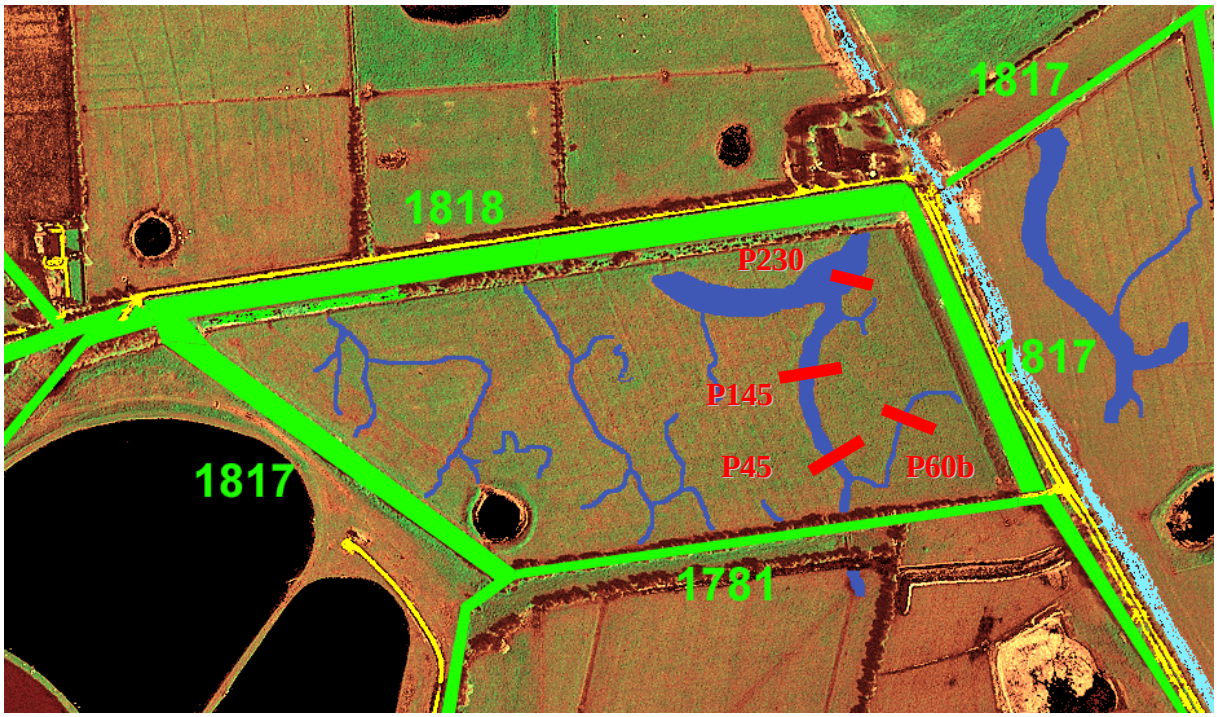
Annexe VI-3. Coupe transversale 3 (amont).

Appendix VI-3. *Cross-shore sequence 3 (upstream).*



Annexe VI-4. Localisation des profils géoradar.

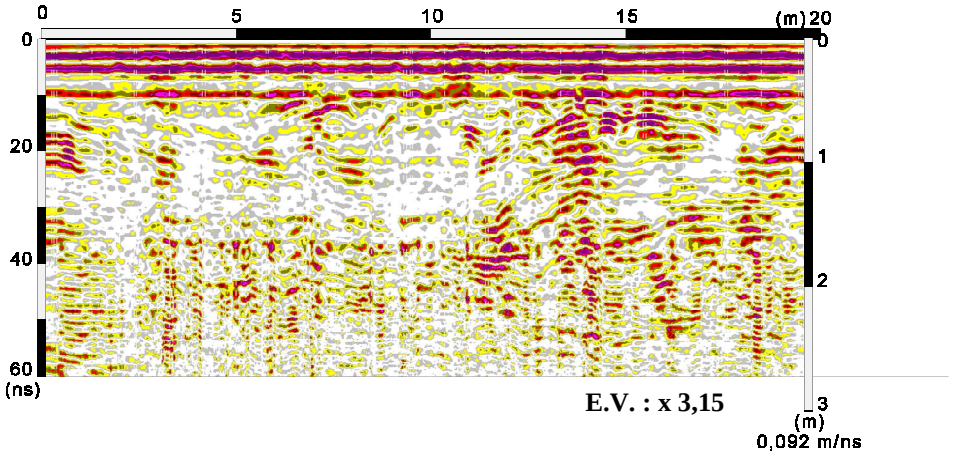
Appendix VI-4. *Location of ground penetrating radar profiles.*



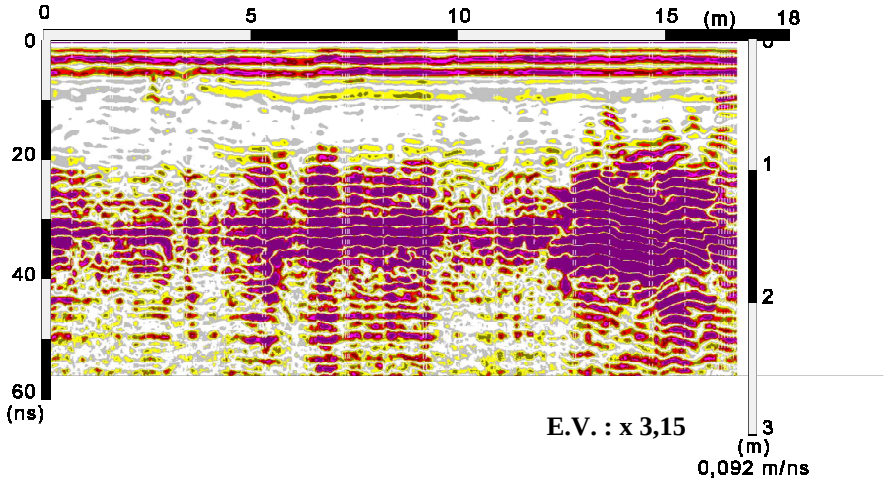
Annexe VI-5. Profils géoradar 60b, 230 et 45.

Appendix VI-5. *Ground penetrating radar profiles* 60b, 230 et 45.

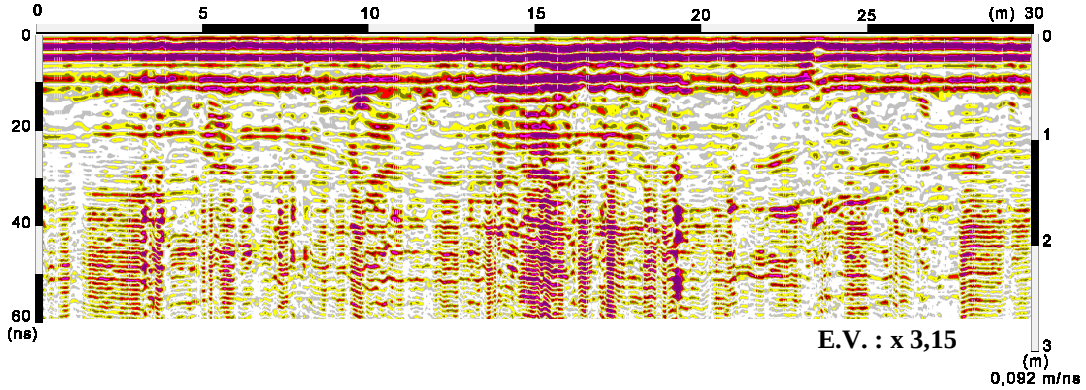
Profil 60b



Profil 230

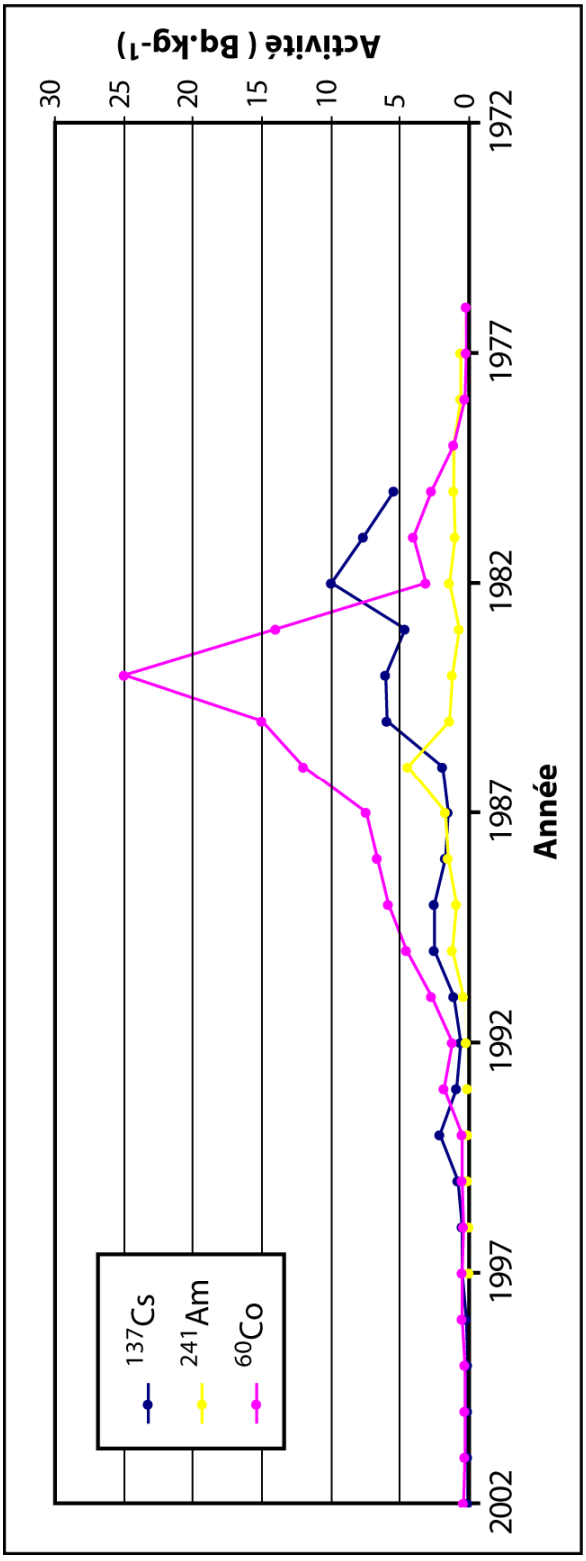


Profil 45



Annexe VI-6. Rejets en radionucléides de la Hague sur la période 1972-2002 (IRSN).

Appendix VI-6. *La Hague radionuclides discharge over the 1972-2002 period (IRSN).*



Annexe VI-7. Photographie RX et signal numérique de la carotte 7 (0-75 cm).

Appendix VI-7. *RX picture and numerical signal of core 7 (0-75 cm).*

