



THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE ROUEN

LA SEDIMENTATION FINE SUR LES VASIERES INTERTIDALES EN ESTUAIRES MACROTIDAUX

Processus, quantification et modélisation de l'échelle semi-diurne à l'échelle annuelle



DELOFFRE Julien

Soutenue le 12 décembre 2005 devant le jury composé de :

CASTAING, Patrice, Professeur à l'Université Bordeaux I **LAFITE, Robert**, Professeur à l'Université de Rouen **LESUEUR, Patrick**, Professeur à l'Université de Caen **PEJRUP, Morten**, Professeur à l'Université de Copenhague **TESSIER Bernadette**, CR CNRS à l'Université de Caen Rapporteur Directeur de Thèse Co-directeur de thèse Rapporteur Examinateur, Présidente de Jury Université de Rouen - U.F.R. des Sciences

Thèse de Doctorat

Julien DELOFFRE

En vue de l'obtention du

Doctorat de l'Université de Rouen Spécialité : Dynamique sédimentaire estuarienne et côtière

LA SEDIMENTATION FINE SUR LES VASIERES INTERTIDALES EN ESTUAIRES MACROTIDAUX :

Processus, quantification et modélisation

de l'échelle semi-diurne à l'échelle annuelle

Soutenue le 12 décembre 2005 devant le jury composé de :

CASTAING, Patrice, Professeur à l'Université Bordeaux I LAFITE, Robert, Professeur à l'Université de Rouen LESUEUR, Patrick, Professeur à l'Université de Caen PEJRUP, Morten, Professeur à l'Université de Copenhague TESSIER Bernadette, CR CNRS à l'Université de Caen

Rapporteur Directeur de Thèse Co-directeur de thèse Rapporteur Examinateur, Présidente de Jury

AVANT-PROPOS

Ce travail a été soutenu par le programme pluridisciplinaire Seine-Aval (<u>http://seine-aval.crihan.fr</u>), financé par les partenaires suivants : l'Etat, la région Haute-Normandie, les régions du bassin parisien, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et les industriels de la région haute-Normandie. Ce travail a également été effectué dans le cadre du programme national PNETOX II « *Les sédiments : un compartiment clé pour l'évaluation des interactions entre contaminants chimiques et biota dans les écosystèmes estuariens.* » et du programme franco-britanique RIMEW-Interreg IIIA (<u>http://info1.scitech.sussex.ac.uk/rimew</u>).

Cette étude a bénéficié des données mises à disposition par l'IFREMER (MAREL Baie de Seine), l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, le service de la navigation de la Seine et le Port Autonome de Rouen.

« La vase ? boue sombre, salissante, collante, odeur d'œuf pourri ».

Ces quelques mots, d'ailleurs justifiés, résument la vision du public sur les sédiments fins cohésifs. Pourtant, il existe, de par le monde, des chercheurs bravant ces spécificités. Les travaux présentés dans ce mémoire concernent cette thématique de recherche. Ils n'ont pu être réalisés que grâce à l'aide et au soutien de nombreuses personnes que je tiens à remercier.

Tout d'abord, je voudrais remercier Patrice Castaing, Morten Pejrup et Bernadette Tessier qui ont accepté de juger ce travail.

Instigateur de ce travail, le professeur Robert Lafite m'a initié aux joies du travail *au sein* des vasières intertidales. Il a supervisé ce travail, de l'acquisition des données à la rédaction. J'espère que ce travail repond à la confiance qu'il a placé en moi. Le professeur Patrick Lesueur a toujours été disponible malgré les diverses responsabilités dont il a la charge. Je le remercie pour sa disponibilité, sa compétence et de sa gentillesse. Sa vision de la recherche m'a permis de *« sortir la tête du guidon » …* Merci à vous, Robert et Patrick…

Ce travail a été effectué au sein du département de géologie de l'Université de Rouen, passer trois ans dans ce laboratoire fut un réel plaisir. Je remercie le personnel du laboratoire, qui a contribué, directement ou indirectement à ce travail. Je tiens plus particulièrement à remercier les professeurs Jean-Paul Dupont, Alain Durand, Benoît Laignel qui m'ont prodigué, conseils, confiance et soutien. Ce travail a bénéficié de l'aide précieuse de Romaric Verney, doctorant au laboratoire M2C. Nous avons acquis ensemble notre expérience sur les vases au fur et à mesure de manips de terrain et de réflexions toujours constructives.

Maillon essentiel du fonctionnement du laboratoire, Maria Decaux, pour sa capacité à régler nos problèmes dans la bonne humeur doit être remerciée. Michel Simon, opérateur de terrain, a stoïquement contribué à la récolte des données, malgré des retours souvent tardifs. Gabriel Bally et Valérie Mesnage, m'ont permis de prendre un bon départ au cours de mon arrivée au laboratoire, travailler en collaboration avec eux fut réellement appréciable.

Je tiens également à remercier les collègues caennais de l'UMR 6143 M2C. Ces remerciements vont plus particulièrement à Jean-Claude Brun-Cottan et Dominique Mouazé dont l'aide fut précieuse dans le cadre de travail. Le professeur Franck Levoy m'a également permis de faire une brève incursion dans le domaine des sédiments non cohésifs.

Les programmes multidisciplinaires dans lesquels ont été effectué ce travail ont été l'occasion de nombreux échanges, au travers de rapports, réunion ou colloques. Merci à tous les participants de ces différents programmes, et plus particulièrement aux thésards, qui d'une manière ou d'une autre ont participé à ce travail. Il m'est difficile de citer toutes ces personnes, de crainte d'en oublier, toutefois les collaborations les plus étroites furent avec le Laboratoire de Microbiologie Du Froid (Université de Rouen, réseau SCALE), l'Ifremer Dyneco-Physed (Brest), le laboratoire de Chimie Analytique et Marine (Université de Lille I), et les chercheurs des Universités de Londres, Brighton et du Sussex.

Les données radiographiques des carottes ont été effectuées à l'Université Bordeaux I, grâce à Joel Saint-Paul, Olivier Weber et Michel Cremer (UMR 5805 EPOC).

Je ne peux pas oublier dans ces remerciements l'un de mes illustres prédécesseurs, Sandric Lesourd (Laboratoire ELICO, Université du Littoral Côte d'Opale). Nous partageons ensemble le goût du terrain et de la vasouille. Enfin grâce à la relecture pousée de Anne Motelay-Massei, ce manuscrit devrait (?) être exempt de coquilles...

Je n'oublie pas les thèsards de M2C... Bon courage à tous.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	09
CHAPITRE I : FONCTIONNEMENTS HYDRODYNAMIQUE ET SEDIMENTAIRE DES ESTUAIRES MACROTIDAUX	13
1. Connaissances du fonctionnement des estuaires macrotidaux	15
1.1. Le milieu estuarien	15
1.1.1. Définition d'un estuaire	15
1.1.2. Classification des estuaires	16
1.1.3. Zonation du système estuarien	21
1.2. Les processus hydrodynamiques en domaine estuarien	21
1.2.1. La marée	21
1.2.2. Le débit fluvial	23
1.2.3. Le vent	26
1.2.4. Synthèse de l'influence des processus hydrodynamiques	27
1.3. Les sédiments fins en estuaire	28
1.3.1. Les matériaux fins	28
1.3.1.1. Origine et caractéristiques	28
1.3.1.2. Transfert et accumulation des particules fines	35
1.3.2. Les dépôts intertidaux et subtidaux	40
1.3.2.1. Les vasières subtidales	40
1.3.2.2. Les vasières intertidales	41
1.3.1.2.1. Processus sédimentaires sur les vasières intertidales	41
1.3.1.2.2. Etat des connaissances sur les vasières intertidales	48
1.3.1.2.3. Classification des vasières intertidales	50
2. Problématique et stratégie d'étude	51
2.1. Objectifs	51
2.2. Sites d'étude	52
2.2.1. Comparaison inter estuaire : fonctionnement des vasières aval	52
2.2.2. Sites intra-estuariens : l'exemple de l'estuaire de Seine	56
2.3. Matériel et méthodes	61
2.3.1. Mesures des paramètres sédimentologiques, lithologiques et rhéologiqu	es 62
2.3.2. Mesures altimétriques	63
2.3.2.1. Principe de fonctionnement	63

	2.3.2.2. Mesure de la distance optimale	65
	2.3.2.3. Impact de la salinité et la température	66
	2.3.2.4. Les différents seuils des voies de l'altimètre	69
	2.3.2.5. Utilisation de l'écho max	72
	2.3.2.6. Validation des mesures altimétriques par comparaison de techniques	74
	2.3.3. Mesures hydrodynamiques hydrosédimentaires à haute fréquence	75
	2.3.4. Données acquises par les réseaux de surveillance des estuaires	77
CHAPITRE	II : PROCESSUS SEDIMENTAIRES SUR UNE VASIERE INTERTIDALE DE	
L'ESTUAIR	E FLUVIAL DE SEINE	79
1.	Introduction	81
2.	Objectifs et strategie	82
3.	Résultats et Bilan (voir discussion § II.4.)	84
4.	Publication	87
CHAPITRE	III : PROCESSUS SEDIMENTAIRES SUR UNE VASIERE INTERTIDALE A	
L'EMBOUC	HURE DE L'ESTUAIRE DE SEINE	115
1. In	troduction	101
2. 0)	bjectifs et strategie	101
3. Re	ésultats et bilan (voir discussion § III.4.)	104
3.	1. Tassement des vases	104
3.2	2. Cyclicité lunaire de dépôt	105
3	3. Validation des résultats par modélisation	107
	3.3.1. Les entrées du modèle	108
	3.3.2. Paramètres fixes	109
	3.3.3. Paramètres calculés à chaque itération	109
	3.3.4. Comparaison des résultats du modèle et des mesures altimétriques	111
4. Pı	iblication	112
CHAPITRE	IV: LES ENREGISTREMENTS SEDIMENTAIRES ET LEUR PRESERVATIO	N AU
SEIN DES V	VASIERES INTERTIDALES	147
1. In	troduction	149
2. 0	bjectifs	149
3. Le	es mécanismes à l'échelle semi-diurne	150
3.	1. Stratégie	150

3.2. Résultats	150
3.2.1. L'estuaire du Medway	151
3.2.2. L'estuaire de l'Authie	151
3.2.3. L'estuaire de Seine	152
3.2.4. Synthèse des processus à l'échelle semi-diurne	156
4. Couplage des données altimétriques et lithologiques	158
4.1. Stratégie	158
4.2. Résultats	160
5. Publication	164
CHAPITRE V : SYNTHESE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE	193
1. Synthèse des résultats acquis	195
1.1. Les mécanismes sédimentaires à l'échelle semi-diurne	195
1.2. Les mécanismes de conservation des séquences de dépôt	197
1.2.1. Les forçages des vasières intertidales	197
1.2.2. Les rhytmes de dépôt	198
1.3. Enregistrement annuel des séquences de dépôt	201
1.4. Applications aux processus chimiques et biologiques	202
1.4.1. Cas de profils géochimiques	202
1.4.2. Cas de profils de contamination métallique	204
1.4.3. Cas de profils d'indicateurs fécaux	205
2. Perspectives de recherche	206
2.1. Comportement à l'interface eau-sédiment	206
2.2. Le rôle du bouchon vaseux dans l'implication du cycle lunaire de dépôt	207
2.2. Evolution des vasières intertidales à l'échelle pluriannuelle	207
2.3. Interprétation des séquences lithologiques	208
CONCLUSIONS GENERALES	
REFERENCES	214
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	233

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les domaines estuariens représentent des enjeux contradictoires en raison de leur position stratégique à l'interface continent-océan. Ils constituent des écosystèmes privilégiés, tout en concentrant des activités socio-économiques considérables : activités portuaires, industrielles, agricoles et de loisirs. Cette dualité s'est renforcée au cours des dernières années en raison de l'intégration des enjeux environnementaux, nécessitant une gestion durable des estuaires. L'un de ces enjeux environnementaux est la capacité de l'estuaire et de son écosystème à réagir par rapport aux concentrations de contaminants métalliques, organiques, et bactériennes. Etant donnée la forte affinité de ces contaminants pour la phase particulaire, et notamment les particules fines (< $63 \mu m$), la prise en compte des transports sédimentaires des particules fines est primordiale. En estuaire, ces particules cohésives sont soumises à une dynamique complexe, partiellement comprise. Cette étude s'attache plus particulièrement à comprendre le fonctionnement des vasières intertidales, zones d'accumulation des particules fines dans les zones latérales des estuaires. Ces environnements ont un rôle écologique important mais sont également des zones sensibles, car elles sont susceptibles d'accumuler des contaminants.

Cette étude vise à répondre à différentes questions :

- Quels mécanismes contrôlent la sédimentation et l'érosion sur les vasières intertidales d'estuaires macrotidaux ? Quel est l'impact de ces mécanismes sur les processus chimiques et biologiques au sein de ces zones ?

- Quels sont les forçages qui contrôlent les rythmes de sédimentation et d'érosion sur les vasières intertidales d'estuaires macrotidaux ? Est-il possible de préserver ces rythmes au sein des carottes sédimentaires ?

L'objectif de cette étude est alors de comprendre la dynamique sédimentaire de vasières intertidales, zone d'accumulation des sédiments fins cohésifs en domaine macrotidal, du mécanisme à l'échelle semidiurne, aux rythmes de sédimentation et d'érosion, jusqu'à l'enregistrement et la conservation des lamines au sein des carottes sédimentaires. Cette compréhension nécessite la prise en compte des paramètres hydrodynamiques, sédimentaires et morphologiques des estuaires. Les vasières intertidales sont soumises à des variations à différentes échelles de temps compris entre l'échelle semi-diurne et l'échelle annuelle (cycle hydrologique). L'ensemble de ces échelles de temps sont rarement prises en compte dans l'étude du fonctionnement des zones intertidales. Ce travail propose une stratégie adaptée à un suivi long-terme, haute-fréquence et haute-résolution des évolutions topographiques (i.e. sédimentation, érosion, tassement) au sein des vasières intertidales. Afin de quantifier le rôle des vasières intertidales dans les transferts sédimentaires estuariens, une étude du fonctionnement des vasières intertidales de l'estuaire de Seine a été effectuée de l'amont à l'aval. Parallèlement, le rôle de la morphologie et de la source sédimentaire sur le fonctionnement des vasières intertidales dans la partie aval des estuaires sera abordée par une comparaison du fonctionnement de trois vasières marines au sein d'estuaires macrotidaux. En complément de cette étude hydrosédimentaire, les propriétés du sédiment ainsi que l'enregistrement et la conservation des dépôts au sein des carottes sédimenaires, sous la forme de lamines seront discutés.

L'intérêt du choix de cette stratégie d'étude sera analysé en fonction de l'utilisation des résultats hydro-sédimentaire dans le cadre de travaux pluridisciplinaires et de l'utilisation des mesures de terrain à long terme et haute résolution dans le cadre de la calibration et/ou validation les modèles numériques de transport sédimentaire.

CHAPITRE I :

FONCTIONNEMENTS HYDRODYNAMIQUE ET SEDIMENTAIRE DES ESTUAIRES MACROTIDAUX



- 1. Connaissances du fonctionnement des estuaires macrotidaux
- 2. Problématique et stratégie d'étude

1. CONNAISSANCES DU FONCTIONNEMENT DES ESTUAIRES MACROTIDAUX

1.1. Le milieu estuarien

1.1.1. Définition d'un estuaire

Un estuaire est un environnement de type côtier à l'interface des domaines continentaux et marins. De nombreuses définitions ont été proposées afin de prendre en compte les processus physiques, chimiques, biologiques et sédimentaires (Fig. I-1). Les premiers travaux sont issus de Cameron et Pritchard (1963) puis Pritchard (1967) définissant un estuaire comme *«une masse d'eau confinée ayant une connexion libre avec la mer ouverte et à l'intérieur duquel l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce issue du drainage du bassin versant ».*

Cette définition reste la plus usitée, toutefois, différents auteurs ont souligné d'autres aspects du milieu estuarien. Dionne (1963) précise les effets de la marée alors que la définition de Pritchard (1967) est reprise et enrichie par Fairbridge (1980). En 1992, Dalrymple et al. ajoutent une perspective sédimentaire à cette définition. La définition proposée par Perillo (1995) prend en compte les aspects biologiques. Dyer (1997), en modifiant la définition de Pritchard (1967) donne une définition, certainement la plus satisfaisante d'un point de vue hydrodynamique : « *une masse d'eau confinée ayant une connexion libre avec la mer ouverte, se prolongeant dans la rivière jusqu'à la limite de l'influence tidale, à l'intérieur de laquelle l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce issue du drainage du bassin versant »*.



Figure I-1 : Représentation schématique d'un estuaire d'après Dionne (1963), Pritchard (1967), Dalrymple et al. (1992) et Perillo (1995).

Cette approche de la définition du milieu estuarien souligne l'une de ses principales caractéristiques : sa complexité. Perillo (1995) recense 40 définitions différentes : la définition d'un estuaire reste dépendante de la perspective étudiée. Toutefois, les estuaires sont le plus souvent définis en fonction de leurs caractéristiques hydrodynamiques. Certains aspects du milieu estuarien ne sont pas pris en compte dans ces définitions, par exemple la morphologie du substrat. De plus, en raison de leur importance socioéconomique, une des principales caractéristiques des estuaires est la pression anthropique, qui modifie la vision actuelle du milieu estuarien, sans que cet aspect soit pris en compte dans les définitions proposées.

1.1.2. Classification des estuaires

De nombreuses classifications, en grande majorité qualitative, ont été proposées pour les milieux estuariens, en fonction de critères hydrodynamiques, morphologiques, ou biologiques; ce dernier type n'étant pas abordé dans le cadre de cette étude.

La première classification significative des estuaires est donnée par Pritchard (1955), basée sur les différents types de circulation des eaux estuariennes. En fonction du mode de mélange des masses d'eau douce et d'eau salée (Dyer, 1973), Pritchard (1955) a défini quatre types d'estuaires (Fig. I-2) :

• **Estuaire stratifié à coin salé**, où les gradients verticaux sont importants. Dans ce cas, le volume d'eau salée apporté par la marée est faible comparativement au volume d'eau douce apporté par le fleuve. Ce type de comportement correspond aux estuaires à faible marnage, dans lesquels la stratification verticale est maximale. L'eau douce s'écoule en surface. En profondeur, la masse d'eau forme un coin salé pratiquement stationnaire (Dyer, 1986). La zone de transition entre les deux couches est restreinte avec un fort gradient, rendant difficile le mélange des masses d'eau (Fig. I-2A).

• Estuaire stratifié à marée. Ce cas est comparable au précédent, toutefois les gradients verticaux sont plus faibles et entraînent un mélange plus important des masses d'eau.

• **Estuaire partiellement mélangé**. Dans ce cas, le volume d'eau apporté par la marée est plus élevé, induisant des courants plus forts et des excursions, longitudinales et verticales, plus importantes, des masses d'eau (Fig. I-2B).

• **Estuaire homogène**, sans gradient de salinité. Les courants de marée deviennent prépondérants par rapport à la circulation de densité, le mélange se fait sur toute la colonne d'eau. Toutefois, des gradients latéraux peuvent se développer. En général, ce type de mélange correspond aux estuaires peu profonds possédant un fort marnage (Fig. I-2C).





Cette classification ne prend pas en compte les variations temporelles et spatiales associées au mélange des masses d'eau liées aux variations du débit fluvial d'une part et aux variations de l'amplitude de marée d'autre part. Simmons (1955) propose une classification simplifiée prenant en compte les variations du débit fluvial et de la marée. De même, la classification de Hansen et Rattray (1966) modifiée par Fischer (1976) permet de prendre en compte les variations temporelles et spatiales du mode de mélange des eaux douces et des eaux salées.

Pritchard (1960) propose également une classification en fonction de l'origine des estuaires, permettant de distinguer les vallées ennoyées au cours de la transgression flandrienne, les fjords, les estuaires formés par la migration des barres littorales et les estuaires d'origine tectonique (Fig. I-3).



Vallées ennoyées (Baie de Chesapeake, Virginie)

(Escaut, Pays-Bas)



Tectonique (Baie de San Francisco, Californie)



Fjords (Russell, Alaska)



Le Floch (1961) puis Nichols et Biggs (1985) ont caractérisé les mécanismes de convergence, liés à la morphologie du système, qui sont d'importance fondamentale en dynamique estuarienne. L'onde de marée progresse dans l'estuaire et subit l'influence du réhaussement de la bathymétrie vers l'amont. Les courants et l'amplitude de l'onde de marée vont alors diminuer progressivement du fait de la dissipation de l'énergie tidale par friction sur le fond et les berges. En fonction de l'évolution de la convergence et du frottement, la classification proposée par Le Floch (1961) permet de distinguer trois types d'estuaires (Fig. I-4)

• Les estuaires hyposynchrones : l'amplitude de la marée et les courants associés diminuent vers l'amont, la dissipation par friction étant supérieure à l'amplification par convergence,

• Les estuaires synchrones : l'amplitude de marée et les courants associés restent constants longitudinalement, dissipation et convergence sont en équilibre,

• Les estuaires hypersynchrones : l'amplitude de marée et les courants associés augmentent brusquement dans l'embouchure avant de diminuer vers l'amont, l'amplification par convergence étant supérieure au terme de friction.



Figure I-4 : Les différents types d'estuaires selon la classification de Le Floch (1961).

La classification quantitative de Davies (1964) puis Hayes (1975) permet de distinguer les estuaires en fonction du marnage à l'embouchure. Elle distingue les estuaires microtidaux (marnage< 2 m), dominés par l'action des vagues d'agitation, mésotidaux (marnage compris entre 2 et 4 m), et les estuaires macrotidaux (marnage>4 m), dominés par les courants de marée.

Fairbridge (1980) propose une classification plus complexe, basée principalement sur le mode de circulation des masses d'eau et la morphologie de l'embouchure. Elle reflète les interactions entre la géomorphologie, les débits fluviaux et les débits solides, les courants de marée, les vagues et les processus à la côte. Cette classification complète celle proposée par Pritchard (1960).

Dalrymple et al. (1992), puis Boyd et al. (1992) proposent une classification à la fois plus complète et plus accessible (Fig. I-5). Cette classification morphologique est basée sur des critères hydrodynamiques, prenant en compte l'influence relative du débit fluvial, de la marée et des vagues d'agitation générées par le vent.



Plus récemment, dans le cadre du développement des outils de gestion des systèmes estuariens, des travaux ont permis de développer des classifications basées sur des variables quantifiables. Les travaux les plus aboutis sont ceux effectués sur les zones côtières australiennes¹ (e.g. : Harris et al., 2002 ; Ryan et al., 2003) et la classification des estuaires européens proposée par Bals (2002). Cette dernière, basée sur 91 estuaires européens, permet d'aboutir à quatre classes d'estuaires caractérisées par des variables contributives dites « principales », choisies comme représentatives de chaque classe (Bals, 2002). Au sein de ces variables contributives, et en raison de l'aspect appliqué de ces travaux, l'accessibilité aux variables est également un critère de choix. Les auteurs de ces travaux soulignent les relations entre l'intrusion saline, la profondeur et la longueur de convergence, confirmant les relations entre morphologie, hydrologie et hydrodynamisme. Ces travaux en cours permettent de mettre en place des classifications en fonction de variables quantitatives mesurables. Ce type de travaux est en voie de développement, notamment dans le cadre de la mise en place d'indicateurs physiques, dans le but d'évaluer l'évolution hydrodynamique et morphologique des estuaires, demandé dans la Directive cadre eau (DCE).

La synthèse des travaux sur les classifications des environnements estuariens montre que, comme la définition d'un estuaire, le rôle de l'anthropisme est peu pris en compte. Pourtant l'évolution de nombreux systèmes estuariens est influencée par l'activité humaine. La morphologie (digues, polders), les évolutions en terme d'apports sédimentaires (dragages, déforestation) et hydrodynamiques (navigation, construction de barrages), aboutissant à des modifications majeures du système estuarien (Lafite et Romaña, 2001).

¹ Une synthèse de ces travaux est disponible : http://www.ozestuaries.org

1.1.3. Zonation du système estuarien

Les principaux travaux sur la zonation du milieu estuarien sont issus des travaux de Dalrymple et al., (1992) d'une part, et de Dionne (1963) repris par Fairbridge (1980). Dalrymple et al. (1992) considèrent la distribution de l'énergie associée aux faciès sédimentaires correspondants (Fig. I-1). Notons que nous ne considérons ici que la zonation des estuaires dits « à marée » selon la définition de Dalrymple et al. (1992). Ces auteurs distinguent l'énergie hydrodynamique totale décomposée suivant les courants de marée, la houle et le débit fluvial, alors que les faciès sédimentaires se distinguent suivant les sédiments fluviatiles, estuariens, et marins. Toutefois, cette classification des faciès sédimentaires reste difficile à appliquer pour les estuaires macrotidaux et/ou les estuaires anthropisés étant donnée la complexité de la distinction entre faciès fluviatiles, estuariens et marins.

Les travaux de Dionne (1963), puis Fairbridge (1980), permettent de diviser les estuaires en trois ensembles distincts, d'amont en aval (Fig. I-1) :

- L'estuaire fluvial caractérisé par la présence permanente d'eau douce soumise à la marée dynamique,
- L'estuaire moyen considéré comme la zone de mélange des eaux douces et des eaux marines,
- L'estuaire marin caractérisé par des masses d'eaux salées, entièrement contrôlées par la dynamique marine.

1.2. Les processus hydrodynamiques en domaine estuarien

1.2.1. La marée

Le phénomène de marée résulte des forces attractives exercées par la lune et le soleil sur les masses d'eau. En raison des vitesses relatives de rotation de la lune et du soleil autour de la terre, ces attractions entraînent différents cycles :

- Le cycle pleine mer/basse mer : au niveau de la Manche, le cycle est semi-diurne d'une durée de 12h25 minutes,
- Le cycle morte-eau/vive-eau ou cycle semi-lunaire, d'une durée de 14 jours environ,
- Le cycle grande vive-eau/petite vive-eau ou cycle lunaire, d'une durée de 28 jours environ,
- Le cycle solstice/équinoxe. Les périodes d'équinoxe correspondent à des amplitudes de marée globalement fortes (mars et septembre), et inversement, en période de solstice sont globalement faibles (juin et décembre).

Les cycles de marée se développent sur des échelles de temps emboîtées (Fig. I-6). Les variations des amplitudes de marée se caractérisent donc par des variations cycliques de fréquences connues. Ces variations entraînent des enregistrements sédimentaires sous la forme de rythmites tidales, identifiées au sein

des sédiments, récents ou anciens (e.g. : Dalrymple et al., 1978 ; Allen, 1981 ; Yang et Nio, 1985 ; Kvale et al., 1989 ; Tessier et Gigot, 1989 ; Dalrymple et al., 1992 ; Tessier et al., 1995 ; Archer, 1996 ; Balouin, 1998 ; Stupples, 2002 ; Choi et Dalrymple, 2004 ; Mazumder et Arima, 2005).



Figure I-6: Variations des hauteurs d'eau au Havre (données PAR).

- (A) : Cycle semi-diurne de morte-eau,
- (B) : Cycle semi-diurne de vive-eau,
- (C) : Cycle semi-lunaire,
- (D) : Cycle lunaire.

Le cycle semi-diurne en Seine montre une courbe de marée différente en période de vives-eaux (B) avec deux maximum de hauteurs d'eau qui induisent une pleine mer de 2 à 3 heures à l'embouchure.

En domaine estuarien, la propagation de l'onde de marée induit une élévation de la surface libre vers l'intérieur des terres (Fig. I-7). Au cours de sa progression, l'onde de marée est déformée en raison de trois mécanismes principaux (Allen et al., 1980). Le frottement sur le fond du chenal induit une dissipation de l'énergie (en fonction de la rugosité des sédiments), qui résulte en une diminution de l'amplitude de l'onde de marée (Fig. I-7). La diminution de la hauteur d'eau provoque l'asymétrie de l'onde de marée (Dyer, 1994), et le rétrécissement des sections concentre l'énergie de la marée et peut entraîner une augmentation de son amplitude (Le Floch, 1961).



Figure I-7 : Propagation de l'onde de marée dans les milieux estuariens : exemple de l'estuaire de la Seine (données PAR).

Ce mécanisme de propagation de l'onde de marée implique une modification de la vitesse des courants de marée : les vitesses de courants au cours de la période de flot sont plus importantes que celles observées au cours de la période de jusant (Fig. I-8).



Figure I-8 : Distribution des vitesses maximales de flot et de jusant sur l'ensemble de l'estuaire de Seine, en période d'amplitude de marée moyenne et un débit moyen (d'après Avoine et al., 1981).

1.2.2. Le débit fluvial

A l'échelle annuelle, le débit fluvial varie : les cours d'eau subissent, au cours de l'année, des variations entraînant des périodes d'étiage et des périodes de crue. Pour les bassins d'une superficie restreinte, le régime hydrologique des cours d'eau est principalement lié aux évolutions des conditions climatiques régionales (Beckinsale, 1969). Plusieurs types de régimes hydrologiques sont identifiés en

fonction des variations saisonnières des débits, selon deux types de critères (Pardé 1943, *in* Guézennec, 1999). Le premier critère est l'allure de la courbe chronologique annuelle des débits journaliers, définissant les régimes simples, mixtes ou complexes et le second est lié à la nature et l'origine de la crue.

Alors que les crues sont des épisodes soudains, les étiages sont des phénomènes progressifs, brusquement interrompus par une crue (Guilcher, 1965). Toutefois, des lâchers de barrage ou des évènements météorologiques exceptionnels peuvent entraîner des variations épisodiques du débit fluvial (Jay et Flinchem, 1997).

Les fleuves transportent des matières en suspension (MES), composées majoritairement de particules fines. Les variations du débit fluvial sont associées à une augmentation de la charge transportée par les fleuves, selon différentes lois d'hysteresis. La comparaison des débits liquides et solides annuels au débouché des grands fleuves mondiaux est présentée sur la figure I-9 (Emery et Milliman, 1978). Cette variabilité est due essentiellement au rôle de l'altitude des fleuves, au climat ou au type de couverture de surface, paramètres contrôlant en grande partie le taux d'érosion du bassin versant.



Figure I-9 : Comparaison des débits solides et liquides annuels des fleuves du monde (d'après Emery et Milliman, 1978 complété par Castaing, 1981).

La Seine, comme les grands fleuves d'Europe, possède une faible charge solide particulaire comparativement aux grands fleuves mondiaux. La moyenne des débits annuels, calculée au cours des 50 dernières années de la Seine est de l'ordre de 450 m³.s⁻¹ au niveau de l'entrée du système estuarien. Toutefois, les débits peuvent être extrêmement variables entre la période d'étiage (moyenne annuelle de l'ordre de 350 m³.s⁻¹) et la période de crue (moyenne annuelle de l'ordre de 1 200 m³.s⁻¹). Concernant le matériel particulaire, le flux annuel moyenné au cours des 10 dernières années (1994-2004) est de l'ordre de 800 000 tonnes. Avoine (1986) puis Meybeck et al. (1998) indiquent que 80% des apports annuels en matériel particulaire sont effectués au cours de la crue.

L'interaction entre le débit fluvial, la propagation de la marée et les houles entraîne le mélange des eaux douces et des eaux salées (Dyer, 1986). Les modalités de dilution des eaux salées et des eaux douces conditionnent les phénomènes hydrodynamiques en domaine estuarien macrotidal. En raison de sa densité, l'eau de mer circule au fond, alors que l'eau douce s'écoule en surface ; leur mélange entraîne la formation d'un coin salé. Ce mélange permet d'établir la formation des gradients de salinité longitudinaux, verticaux et latéraux (Pritchard, 1952). En raison de la différence de salinité des eaux, des courants résiduels sont associés à ce mécanisme, auxquels correspondent des vitesses résiduelles (Pritchard, 1952 ; Pritchard, 1955 ; Simmons, 1955 ; Allen, 1972). Le point nodal de densité est alors défini comme le lieu où les vitesses résiduelles au fond sont nulles (Fig. I-10).



Figure I-10 : Circulation résiduelle de densité dans un estuaire. Les vitesses résiduelles sont calculées suivant l'écoulement du flot (Sf), l'écoulement du jusant (Sj) et une durée d'intégration (T), suivant la formule : Vr = (Sf-Sj)/T (d'après Allen et al., 1972).

Le rapport entre le débit fluvial et le volume d'eau introduit par la marée a permis d'établir une classification basée sur la stratification saline (Pritchard, 1955, Fig. I-2). Toutefois, le mélange des eaux

douces et des eaux salées est extrêmement variable dans le temps et l'espace, en fonction des fluctuations du débit fluvial et de la marée. A titre d'exemple, une crue ou une période de vive-eau entraînent une meilleure stratification des eaux. Les vitesses résiduelles sont calculées sur une durée d'intégration du cycle semidiurne. Toutefois, le mélange eaux douces et des eaux salées possède une forte variabilité temporelle et spatiale (Simmons, 1955) en raison des différents forçages hydrodynamiques.



Ainsi, l'estuaire de Seine (Fig. I-11), en fonction des variations du débit fluvial et de l'amplitude de marée, est soit stratifié avec un coin salé en crue, soit stratifié en étiage (Avoine, 1981).

1.2.3. Le vent

En raison de leur morphologie et de leur faible profondeur, les estuaires sont soumis à l'action du vent (vagues, houles et clapot), susceptible de participer au transport sédimentaire. Pour de faibles profondeurs, les mouvements de l'eau, induits par la houle, génèrent sur le fond des contraintes de pression et de cisaillement pouvant provoquer la remise en suspension des vases et des sables fins, ensuite transportés par les courants de marée (Ryan et Cooper, 1998). Les sédiments fins peuvent subir, sous ces conditions, des modifications de leurs propriétés rhéologiques par le mécanisme de liquéfaction (de Wit et Kranenburg, 1997).

Généralement, l'impact du vent sur la remise en suspension des sédiments est surtout significatif à l'embouchure des estuaires, et des agitations peuvent avoir, en domaine ouvert, une influence importante sur la morphodynamique de l'embouchure. De nombreux auteurs ont souligné le rôle de la houle sur les domaines intertidaux d'embouchure (Green et al., 1997; Ryan et Cooper, 1998; Christie et al., 1999; Bassoullet et al., 2000; Andersen, 2001). Toutefois, à l'exception de la classification de Dalrymple et al. (1992), le rôle de la houle n'est pas pris en compte dans les classifications des domaines estuariens.

1.2.4. Synthèse de l'influence des processus hydrodynamiques

L'influence respective des processus hydrodynamiques a été synthétisée par Darymple et al. (1992), différentes typologies d'estuaires ont été considérés dans cette étude ; la figure I-12 présente le cas d'un estuaire à marée.



Figure I-12 : Distribution de l'énergie au sein d'un estuaire « à marée » selon la classification de Dalrymple et al., 1992 (d'après Dalrymple et al., 1992).

Bien que schématique, cette figure résume le rôle respectif des processus hydrodynamiques en domaine estuarien. Pour l'estuaire de Seine, le rôle majeur de la houle dans la partie externe de l'embouchure (Da Silva, 2002), celui-ci apparaît dans la classification de Dalrymple et al. (1992) comme un estuaire dominé par la marée et le débit fluvial. De plus, le rôle des ondes de batillage (agitation sur les berges due à la navigation) dans la partie amont de l'estuaire doit être pris en compte.

1.3. Les sédiments fins en estuaire

1.3.1. Les matériaux fins

1.3.1.1. Origine et caractéristiques

Les sédiments fins estuairens sont définis comme étant des particules d'une taille granulométrique inférieure à 63 microns (μ m), composés par les argiles (au sens granulométrique, correspondant aux particules d'une taille inférieure à 2 μ m) et par les silts (de taille comprise entre 2 et 63 μ m). Au contraire des sables, considérés comme des particules possédant une taille et une densité invariable dans le temps, les particules fines sont dites « cohésives » et leurs caractéristiques et propriétés sont extrêmement variables dans le temps (e.g. : Migniot, 1989 ; Eisma, 1993 ; Whitehouse et al., 2000a ; Winterwerp et Van Kesteren, 2004).



Figure I-13 : Schéma des différentes origines du matériel en suspension au sein des estuaires (Eisma, 1993).

Dans les grands fleuves francais, les MES sont dominées par les particules fines. La proportion des minéraux supérieurs à 63 µm en suspension dépasse rarement 10% au sein des estuaires français (e.g. Castaing, 1981 ; Lafite, 1990). Malgré de nombreuses sources de MES recensées par Eisma (1993), une ou plusieurs sources dominent le système, variables selon l'estuaire considéré (Fig.I-13). Selon Eisma, (1993), les estuaires possédant un débit fluvial important sont dominés par la source fluviatile, alors que pour les estuaires mélangés, les apports fluviaux dominent dans la partie fluviale du système et les apports océaniques dominent dans la partie marine. En domaine estuairen, les sources atmosphériques sont le plus souvent négligeables, à l'exception du transport de sables éoliens (Eisma, 1993). D'autres sources telles que l'érosion

côtière, l'apport par les glaciers ou le ruissellement sont fortement dépendantes du contexte climatique local. L'impact anthropique (piégeage dans les bassins de ports, dragages...) peut également être une source non négligeable de matériel et de remaniement.

Lorsque les sources sont multiples, l'origine du matériel fin devient difficile à déterminer, notamment en raison du recyclage des particules au sein de l'estuaire. L'identification et la quantification des sources de matériel fin peuvent alors être connues grâce à l'analyse isotopique ou à l'étude de la composition de MES. Par exemple, le matériel d'origine marine est caractérisé par la présence de fragments de coquilles et de frustules de diatomées marines (Dupont et al., 1994).

Les sédiments au sein des domaines estuariens macrotidaux, notamment au niveau des vasières intertidales, présentent généralement un mélange entre une proportion de sable et de particules fines (Fig. I-14), dont la proportion varie au cours du temps et dans l'espace. D'autres analyses permettent de compléter l'analyse de la composition du sédiment : minéraux argileux, teneur en matière organique, chlorophylle a, EPS, carbonates, oxydes ou SiO₂. De plus, la granulométrie et le degré de cohésion du sédiment sont deux facteurs clefs du comportement sédimentaire des particules fines (e.g. Chester and Ockenden, 1994 ; Mitchener et al., 1996 ; Torfs et al, 1996 ; Black et Paterson, 1997 ; Soulsby, 1983 ; Whitehouse et al., 2000a).



Figure I-14 : Exemples de spectres granulométriques au sein des vasières intertidales localisées dans la partie aval des estuaires étudiés.

Les sables estuariens sont principalement d'origine marine, en majeure partie issus, au Nord-Ouest de l'Europe, du remaniement de dépôts fluviatiles apportés lors des phases antérieures de bas niveau marin

puis remaniés au cours de la dernière remontée du niveau marin. En domaine macrotidal, un granoclassement décroissant des sables du domaine marin vers le domaine estuarien est observé. Cette granodécroissance est à mettre en relation avec la diminution de l'énergie de la marée au cours de sa propagation au sein de l'estuaire. Parallèlement, un déplacement par charriage peut être observé, souvent contribuant au colmatage de l'embouchure de l'estuaire lié à la dérive littorale. Une fraction coquillière significative peut être associée à la phase minérale détritique, comme dans le cas de la Seine. Enfin, les transferts de sables et de vases dans les milieux estuariens peuvent être modifié par l'activité anthropique. A titre d'exemple, un volume de 4.10⁶ m³ de sédiment est dragué par an dans la partie aval de l'estuaire de Seine (Lesourd, 2000).



Figure I-15 : Evolution de la contrainte d'érosion en fonction du mélange sable-vase (d'après Chester et Ockenden, 1994). τ_e = contrainte critique d'érosion.

La proportion de sable, bien que souvent faible au niveau des environnements intertidaux marginaux (vasières), modifie de manière significative les caractéristiques et le comportement du sédiment, en raison des interactions entre le sédiment cohésif et le non-cohésif (e.g. Torfs et al., 1996 ; Mitchener et al., 1996 ; Waeles et al., 2005). Les mélanges sablo-vaseux ou vaso-sableux sont encore mal compris (Van Ledden et al., 2004), ils ne peuvent pas être considérés comme possédant un comportement moyen entre sable et vase (Fig. I-15 ; Whitehouse et al., 2000a), alors que la majorité des études se sont concentrées soit sur les sables, soit sur les vases.

Le rôle d'autres paramètres, physiques (granulométrie, teneur en eau, type d'argiles, perméabilité...), biologiques (teneur en matière organique...) ou chimiques (pH, salinité...) a été également souligné par des études en laboratoire ou in-situ (Black et Paterson, 1997). D'un point de vue lithologique, le sable en milieu naturel se présente soit sous la forme d'un mélange avec la vase ou sous la forme de niveaux ; ces niveaux sableux compliquent la prise en compte du comportement du sédiment, en raison de ces variations lithologiques verticales. Ainsi, malgré les travaux entrepris dans ce domaine, les mélanges sable-vase restent encore mal compris. Le mouvement des particules fines en milieu estuarien est dépendant des processus hydrodynamiques. En fonction de leurs caractéristiques, des contraintes physiques, chimiques et biologiques du milieu, le transport, l'accumulation et l'érosion des particules s'effectuent dans l'estuaire. Le sédiment remis en suspension par érosion ou arrachement est susceptible d'être transporté par la masse d'eau suivant l'hydrodynamique du système. Le maintien et le transport des MES est alors fonction de la turbulence dans la colonne d'eau. Inversement, lorsque la turbulence décroît fortement près du fond, les agrégats atteignent le fond et constituent un dépôt. L'amplitude de ce dépôt est également fonction de la quantité de MES disponible dans la masse d'eau. Ainsi, malgré l'extrême variabilité des vitesses de courant, de la profondeur d'eau et des houles, des périodes de plus faible turbulence dans la masse d'eau permettent la décantation des MES et leur dépôt (Fig. I-16).



Figure I-16 : Schéma des processus de transport, dépôt et remise en suspension des vases au cours du cycle de marée semi-diurne (Whitehouse et al., 2000a). τ_e = contrainte critique d'érosion ; τ_d = contrainte critique de dépôt.

Lorsque la turbulence est insuffisante pour s'opposer à la chute des particules, liée à leur propre poids, les particules chutent vers le fond. La chute des particules fines en suspension est dépendante de leur taille, leur densité et leur forme, toutefois, une approximation de la vitesse de chute des particules en fonction de leur taille a été proposée par Dupont (2001) (Fig. I-17).



Figure I-17 : Evolution de la taille des MES en relation avec la vitesse de chute des particules (Dupont , 2001).

Le mécanisme d'agrégation (floculation) et de désagrégation (défloculation) des particules fines (e.g. : Krone, 1962 ; Partheniades, 1962 ; Migniot et al., 1968 ; Pejrup, 1988a ; Van Leussen, 1988 ; Dyer et Manning, 1999 ; Winterwerp, 2002 ; Verney, 2006), donnant naissance à des agrégats de particules (ou flocs) plus ou moins complexes (e.g. Manning et Dyer, 1999 ; Manning, 2004 ; Manning et al., 2004). Ce processus gouverne la taille, la densité et la forme des flocs. La cohésion des flocs, de ce fait, joue un rôle sur la vitesse de chute des particules. Ce processus reste difficile à quantifier en milieu naturel, toutefois les paramètres de contrôle ont été mis en évidence. Les facteurs physico-chimiques (salinité, assemblages des minéraux argileux, concentration, turbulence, température) ou biologiques (plancton) contrôlent les processus de floculation/défloculation. Malgré l'identification de ces processus, leur quantification reste limitée pour de nombreux paramètres (e.g. : biologie).

En milieu estuarien, les relations entre vitesses de chute et floculation des particules en suspension sont fortes. La figure I-18 présente l'évolution de la vitesse de chute en fonction de la concentration au sein de différents estuaires. Cette figure montre également l'importance du type de matériel, ainsi, pour deux estuaires distincts à une même concentration, la vitesse de chute peut évoluer d'un facteur 3 (Fig. I-18). Cette comparaison montre que les vitesses de chute sont relativement élevées en Seine.

Dans le milieu estuarien, les particules fines peuvent être contenues dans différents corps sédimentaires vaseux (Fig. I-19A). La vase fluide (ou crème de vase) a été définie par Krone (1962) comme

étant un mélange eau-sédiment d'une concentration en MES supérieure à 100 g.l⁻¹. Elle se forme suivant le gradient de concentration en MES et la lutocline (Wells, 1995). Selon Whitehouse et al. (2000a) la différenciation entre vase fluide et MES se fait lorsque la concentration en particules est suffisamment importante pour changer les propriétés rhéologiques, comparativement à une eau faiblement chargée. Lorsque la vase fluide devient partiellement consolidée et atteint un niveau significatif de résistance à l'érosion, cette vase fluide devient un « sol meuble » (au sens mécanique). La vase fluide peut se trouver dans des environnements calmes ou soumis à un écoulement ou être le résultat de la liquéfaction sous l'action des vagues (Fig. I-19A).



Figure I-18 : Relations entre concentration et vitesse de chute pour différents estuaires européens (Delo and Ockenden, 1992 complété par Lafite pour la Seine (2001)).

La crème de vase est différenciée suivant ses états de concentration, bien que variable d'un estuaire à l'autre (Kirby et Parker, 1993 ; Ross et Mehta ; 1989, Dyer ; 1986 ; Eisma, 1993) :

- Vases fluides mobiles, correspondant à des concentrations supérieures à 1 g.l⁻¹ (selon Eisma, 1993), mais plus généralement, la concentration de ce type de couches turbides est de l'ordre de 150 g.l⁻¹.
- Vases fluides stationnaires correspondant à des concentrations supérieures à 250 g.l⁻¹, voire 300 g.l⁻¹ selon Galenne (1974).
- Vases consolidés qui forment le fond de l'estuaire sont les plus résistantes à l'érosion.



Figure I-19 : Formation et relations entre les différentes couches turbides.
(A) : Profil vertical de concentration schématisant les différents états de concentration des vases (d'après Ross et Mehta, 1989),
(B) : Relation entre les différentes couches turbides (d'après Kirby et Parker, 1983).

Selon Dyer (1986, 1995), les processus sédimentaires qui concernent le fonctionnement des vases s'appliquent à différentes échelles de temps. Les MES sont mobilisées suivant le cycle de marée semi-diurne, les vases fluides mobiles sont concernées par des processus de l'ordre de plusieurs heures à une journée (suivant les courants de marée), les vases fluides stationnaires sont mobilisées suivant l'amplitude de marée (échelle du mois), et les vases consolidées sont associées à des processus à l'échelle de temps annuelle.

Toutefois, le comportement de la crème de vase est mal connu (Whitehouse et al., 2000a), en raison de son positionnement à l'interface solide-liquide, de la difficulté de mesure à proximité du fond associée à de fortes concentrations et de leur extrême variabilité liée à l'influence des processus de floculation (notamment en terme de rhéologie et densité), de la variété de minéralogie des argiles, des teneurs en matière organique. Or en raison d'un comportement différencié (Fig. I-19B), la connaissance des caractéristiques rhéologiques des sédiments des vasières intertidales devient primordiale. Le paramètre de degré de cohésion du sédiment peut être approché de manière indirecte en considérant différents paramètres tels que la porosité, la teneur en eau, l'indice des vides ou la concentration massique. La cohésion du sédiment peut seulement être évaluée par la mesure adaptée à la mesure de la cohésion non drainée et/ou à la contrainte de cisaillement maximum, grâce à des scissomètres (pour les vases indurées) ou des viscosimètres (pour les vases fluides) ou par l'utilisation d'érodimètres sur le terrain (e.g. Black et Paterson, 1997 ; Le Hir et al., 2005).

1.3.1.2. Transfert et accumulation des particules fines

A l'embouchure des estuaires macrotidaux, les sédiments fins en suspension se concentrent pour former le « bouchon vaseux » (Glangeaud, 1938), caractéristique des estuaires dominés par la marée (Wells, 1995). Généralement, il se localise dans la partie aval de l'estuaire à l'amont de l'intrusion saline (Potsma, 1961 ; Allen, 1972 ; Avoine, 1981 ; Castaing, 1981). Sa concentration varie fortement d'un estuaire à l'autre (Uncles et al., 2002). Cette accumulation de particules fines est générée par la déformation de l'onde de marée à l'intérieur de l'estuaire et la circulation résiduelle de densité, ces mécanismes, considérés séparément, sont à l'origine de deux types de bouchon vaseux (Allen et al., 1980 ; Castaing, 1981 ; Dyer, 1986) :



Figure I-20 : Mécanismes à l'origine de la formation du bouchon vaseux :

(A) Le bouchon vaseux lié à la circulation résiduelle (d'après Dyer, 1986).

(B) Le bouchon vaseux dynamique lié à l'asymétrie de marée (d'après Allen et al., 1980)

• <u>Bouchon vaseux lié à la circulation résiduelle (Fig. I-20A).</u> Dans les estuaires où la marée dynamique est moins forte (estuaires micro- et méso-tidaux), la stratification joue un rôle important : l'écoulement des eaux salées vers l'amont se fait en profondeur alors que l'écoulement des eaux douces vers l'aval se fait en surface. Ce type d'écoulement aboutit à la formation d'un point nodal, décrit précédemment (Fig. I-7). Les MES provenant de la zone amont transitent en surface vers l'aval, et peuvent chuter et intégrer la circulation dirigée vers l'amont près du fond.

Les MES s'accumulent alors au niveau du point nodal, et peuvent amorcer un nouveau cycle (Castaing, 1981). Ce processus implique une stratification de la masse d'eau (estuaires stratifiés).

• <u>Bouchon vaseux lié à la propagation de l'onde de marée (« bouchon vaseux dynamique »).</u> Dans les estuaires macrotidaux, la formation du bouchon vaseux est préférentiellement liée à la propagation de l'onde de marée dans l'estuaire (Fig. I-20B). Ce mécanisme de concentration des particules fines (Salomon et Allen, 1983 ; Sottolichio, 1999) est gouverné par:

- Une remise en suspension plus importante au cours du flot comparativement au jusant,
- Une masse particulaire en suspension plus importante en flot qu'au jusant,
- Une décantation plus importante des particules à pleine mer qu'à basse mer.

Dans les estuaires macrotidaux, le bouchon vaseux qui se développe est préférentiellement formé par l'asymétrie de l'onde de marée, toutefois la combinaison des deux mécanismes de formation du bouchon vaseux a été observée (Castaing, 1981 ; Salomon et Allen, 1983 ; Brenon, 1997 ; Brenon et Le Hir, 1999a ; 1999b ; Sottolichio, 1999).



Figure I-21 : Concentration du bouchon vaseux de l'estuaire de la Seine en fonction du cycle de marée lunaire en période d'étiage (débit <200 m³.s⁻¹ (d'après Avoine, 1981).

La dynamique du bouchon vaseux est contrôlée par les cycles de marée (Fig. I-21). A l'échelle du cycle de marée semi-diurne, les périodes de flot et de jusant favorisent le développement du bouchon vaseux dans la colonne d'eau, alors que les périodes d'étale favorisent la décantation des particules fines. De même, l'augmentation des vitesses de courant au cours des périodes de vives-eaux entraîne une augmentation de la concentration du bouchon vaseux dans la colonne d'eau comparativement aux périodes de mortes-eaux (e.g.

Avoine, 1981 ; Castaing, 1981). De plus, le centre du bouchon vaseux est localisé plus en amont en période de vive-eau comparativement aux périodes de mortes-eaux (Fig. I-21).

Les périodes d'agitation liées au vent contribuent, de manière ponctuelle, au fonctionnement du bouchon vaseux. Au cours des périodes d'agitation, la turbulence au sein de la masse d'eau est importante, entraînant une augmentation de la turbidité au sein de la colonne d'eau (Fig. I-22).



Figure I-22 : Profils verticaux N-S de turbidité (/0 CMH) dans les eaux de la Baie de Seine, au cours de la basse mer et en crue, suivant différentes conditions d'agitation (Avoine, 1981).

Le débit fluvial contrôle également la dynamique du bouchon vaseux, son développement et sa position est dépendante de l'intensité du débit fluvial (Fig. I-23). En période d'étiage, les débits fluviaux sont faibles, le bouchon vaseux est localisé à l'intérieur de l'estuaire et il est bien développé. En revanche, au cours des périodes de crue, en raison de l'importance relative de la pression exercée par la masse d'eau douce, le bouchon vaseux est localisé plus en aval, et expulsé au cours des périodes des plus fortes crues (Fig. I-23). Cette dynamique du bouchon vaseux décrite pour l'estuaire de la Gironde par Castaing (1981), est similaire à celui de la Seine (Avoine, 1981 ; Lesourd et al., 2003).



Figure I-23 : Position et concentration du bouchon vaseux de l'estuaire de la Gironde en fonction du débit fluvial, mesures en morte-eau à basse mer (d'après Castaing, 1981).

Les aménagements, en modifiant les conditions hydrodynamiques des systèmes estuariens, peuvent également être responsables d'une modification du comportement du bouchon vaseux. Le déplacement du bouchon vaseux de l'estuaire de Seine vers l'aval est de l'ordre de 50 km en 20 à 30 ans (Avoine et al., 1981 ; Avoine et al., 1996).

La remise en suspension est bien connue dans de nombreux estuaires par des mesures de terrain (e.g. Avoine, 1981; Castaing, 1981). Les bases de données ont permis de valider les modèles simulant le fonctionnement du bouchon vaseux à différentes échelles de temps (e.g. : Brenon, 1997; Sottolichio, 1999; Le Hir et al., 2001; Uncles et al., 2002; Fettweis et van der Eynde, 2003).

Pour l'estuaire de Seine, Avoine (1982) a montré que la quantité de matériel du bouchon vaseux dans la colonne d'eau variait entre 64 000 et 430 000 tonnes au cours des différents cycles de marée et des différents débits. Comparativement le débit annuel moyen du fleuve au barrage de Poses (limite amont de l'estuaire) est de l'ordre de 800 000 tonnes. Guézennec (1999) a montré que les transferts à l'échelle de l'estuaire ne peuvent être considérés suivant un schéma simple selon lequel le matériel apporté par le fleuve (80% durant la crue) est transporté intégralement et directement jusqu'au bouchon vaseux.

Seules 45 à 55% des particules issues du fleuve sont rapidement apportées au bouchon vaseux (Guézennec, 1999). Ce stockage/déstockage des particules est lié à la présence de nombreuses zones de décantation des particules fines dans les zones intertidales marginales amont. Les courants dans le chenal central de Seine sont trop élevés pour y permettre un stockage significatif des particules fines issues du bassin versant (Lesourd, 2000). Ainsi, le rôle des vasières intertidales amont n'est pas négligeable à l'échelle

de l'estuaire de Seine, notamment par un déstockage du matériel, déposé en crue, au cours de la période d'étiage (Guézennec, 1999).

Guézennec et al. (1999) ont développé pour l'estuaire de Seine un schéma conceptuel de transfert particulaire au cours d'un cycle vive-eau/morte-eau d'étiage (Fig. I-24). Au cours des périodes de vive-eau, l'écoulement de l'eau douce et des MES associées est ralenti par l'augmentation du volume d'eau présent dans l'estuaire amont. Au cours de cette même période, l'augmentation des MES dues aux vitesses maximales de courant. En période de déchet, les concentrations en MES sont les plus fortes, leur transport vers l'estuaire moyen est alors maximum. Cette période est de courte durée, en raison de la décantation et du dépôt des particules au cours de la période de morte-eau. Les particules déposées au cours des périodes de morte-eau ne peuvent alors être transportées qu'au cours de la période de vive-eau suivante.



Figure I-24 : Schéma conceptuel du transfert particulaire en étiage, à l'échelle du cycle vive-eau morte-eau dans la partie fluviale de l'estuaire de Seine (Guézennec, 1999).

Le transfert des particules en suspension doit être considéré à différentes échelles de temps : de l'échelle du cycle de marée semi-diurne à l'échelle du cycle hydrologique annuel (alternances crue-étiage) et pluri annuel (variation de la pluviosité interannuelle). Ces paramètres ont un impact sur les dépôts sédimentaires intertidaux. Il est donc nécessaire de développer une approche haute fréquence et long terme afin d'intégrer ces différentes échelles.

1.3.2. Les dépôts intertidaux et subtidaux

1.3.2.1. Les vasières subtidales
A l'embouchure des systèmes estuariens macrotidaux, les particules fines peuvent s'accumuler en domaine subtidal (e.g. Lesueur, 1992 ; Lesueur et al., 2003). Les vases de plate-forme ont été décrites par McCave (1985), puis Stanley et al., (1983). Cinq environnements de dépôts ont été discriminés (Fig. I-25) : les littoraux vaseux (« muddy coast »), les dépôts de proche plate-forme (« nearshore mud-belt »), les dépôts de plate-forme médiane (« mid-shelf mud belt »), les dépôts de plate-forme externe (« outer-shelf mud-belts ») ou de vastes couvertures vaseuses de plateau (« shelf-mud blankets »).



Figure I-25 : Représentation des différentes zones d'accumulation des vases de plate-forme (d'après McCave, 1972).

Comparativement aux milieux intertidaux, la dynamique des vasières subtidales est moins connue, certainement en raison de la difficulté de prélèvements et la variabilité spatiale de ce type de dépôts. En estuaire de Seine, selon Lesourd (2000) et Garnaud (2003), ces zones envasées temporaires sont extrêmement fluctuantes suivant différents pas de temps (Fig. I-26). Toutefois, ces auteurs ont mis en évidence le rôle prépondérant des débits fluviaux sur le fonctionnement de ces envasements subtidaux : l'envasement est plus développé en période de crue et peu après (Lesourd et al., 2003), en liaison avec la dynamique du bouchon vaseux. Dans ce cas, les périodes de crue contrôlent les apports vers la baie et leur accumulation à l'embouchure de l'estuaire de Seine. Lesueur (2001) parle alors de « crues estuariennes ».



Figure I-26 : Schéma conceptuel des mécanismes de sédimentation et de consolidation des vases, liés au dépôt de crue (Lesueur et Lesourd, 1999).

La remise en suspension et le transport des sédiments fins en domaine subtidal est alors assuré par les courants, les périodes de houle et de tempête. Cette dynamique des dépôts subtidaux en estuaire de Seine induit une cyclicité annuelle en lien avec la dynamique du bouchon vaseux, et l'évolution des propriétés de cohésion des sédiments fins.

1.3.2.2. Les vasières intertidales

1.3.1.2.1. Processus sédimentaires sur les vasières intertidales

Les zones d'accumulation du sédiment fin possèdent des intérêts d'un point de vue écologique, environnemental et économique. D'un point de vue écologique, les vasières, riches en matière organique, sont des zones actives de production primaire : les processus physiques, chimiques et biologiques déterminent, en partie, le fonctionnement des réseaux trophiques estuariens. La faune et la flore benthique sont développées au niveau des vasières intertidales, et représentent donc des réservoirs de la biodiversité. Les vasières intertidales assurent les fonctions vitales des organismes qui y vivent (reproduction, alimentation, protection...). D'un point de vue économique, les vasières intertidales ont également un rôle important. Elles sont, par exemple, un support pour la conchyliculture (le bassin de Marennes-Oléron représente 44% de la production française d'huîtres). L'utilisation de boues de dragage pour former des vasières intertidales artificielles est en cours d'étude, afin de valoriser ces matériaux (Bolam et Rees, 2003 ;

Bolam et al., 2004 ; Bolam et Whomersley, 2005). Ces zones semblent fonctionner, d'un point de vue biologique, comme des systèmes naturels.

D'un point de vue environnemental, ces zones accumulent des contaminants, en raison de l'affinité avec les particules fines, ces polluants sont alors susceptibles de s'accumuler au niveau des vasières intertidales (e.g. Decho, 2000 ; Spencer, 2000 ; Billon, 2001 ; Zhang et al., 2001 ; Clarisse, 2003 ; Cundy et al., 2005a). La compréhension et la quantification des transports particulaires au sein des vasières intertidales permettent de déterminer leur rôle en tant que puit ou source de contaminant à l'échelle de l'estuaire. Il s'agit donc d'une problématique fondamentale dans la compréhension du fonctionnement du système estuarien et de la mise en place d'une gestion durable de ces environnements.

D'un point de vue morphologique, les domaines intertidaux sont divisés en deux zones : une partie basse de vase nue (ou slikke²) et une partie haute végétalisée (ou schorre³). Ces zones sont de dimension extrêmement variable, le schorre étant parfois absent du fait de la présence de digues. Le schorre peut évoluer en marais salé associé à une végétation généralement dense et épaisse, parfois interrompue par des chenaux d'écoulement. Cette zone est recouverte uniquement à pleine mer au cours des marées de fortes vives-eaux, de nombreux végétaux s'y développant suivant un étagement précis. Le passage du schorre à la slikke se fait soit de manière progressive, soit de façon abrupte (dénivellation de plusieurs dizaines de centimètres). La zone de slikke est le plus souvent recouverte par la marée (limite supérieure : haute-mer de marée moyenne), la flore y est généralement assez peu développée, en revanche la faune benthique est abondante.

ATMOSPHERE	PROCESSUS		FO Pluie B	RCAGES
COLONNE D'EAU	Floculation Vitesse de chute Turbulence	Vagues	Source séc Cour	dimentaire rants
	Erosion-Depot	Biologie	de la surface	immersion
SEDIMENT	Tassement Biostabilisation Bioturbation		Prop du séc	briété diment

Figure I-27 : Processus et forçages sur l'évolution des vasières intertidales estuariennes.

² du néerlandais slijk signifiant boue.

³ du néerlandais schor signifiant pré salé.

Les différents processus et forçages qui régissent le fonctionnement des vasières intertidales sont répertoriés dans la figure I-27 :

• Certains processus restent mal connus,

• La méconnaissance des processus peut être due à la difficulté d'obtenir des mesures *in-situ* pertinentes, par exemple dans les faibles tranches d'eau. Parallèlement, les travaux en laboratoire, menés notamment sur les mécanismes physiques et permettant d'obtenir des lois empiriques peuvent être l'objet de discussions lorsqu'elles doivent être appliquées à l'environnement naturel (Whitehouse et al., 2000a).

• Le suivi du fonctionnement morphosédimentaire d'un milieu intertidal nécessite un suivi à des échelles de temps, extrêmement variables. A titre d'exemple, alors que la houle est un phénomène à haute fréquence, le débit fluvial nécessite un suivi annuel. Malgré les progrès récents de l'instrumentation, il reste difficile de faire des mesures couplant haute fréquence et long terme.

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. Une grande variabilité spatio-temporelle est observée dans les domaines intertidaux (e.g. : Uncles et al., 2000). De nombreux paramètres permettent de caractériser le sédiment naturel (Hayter et Mehta, 1982, 1986). 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 (Fig. I-15). En raison d'un comportement différencié des sédiments (Fig. I-19B), 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 ; Berlamont et al., 1993 ; Teisson et al., 1993 ; Lesourd et al., 2005). Ce mécanisme induit une augmentation de la densité du sédiment au cours du temps, et la porosité du sédiment diminue par expulsion de l'eau interstitielle (Fig. I-15). Cette augmentation de densité est associée à une augmentation de sa cohésion et donc de sa résistance au cisaillement 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.

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 (e.g. Maa et Mehta, 1987; Ross, 1989; de Wit et Kranenburg, 1996; 1997; van Kessel et Kranenburg, 1998). En diminuant la cohésion du sédiment, ce processus favorise donc sa remise en suspension.

L'érosion sur les vasières intertidales 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 ; notons que seuls les courants permettent un transport significatif des MES. 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 : cette 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.

• Le détachement d'agrégats : lorsque la contrainte critique de cisaillement est atteinte, les agrégats sont détachés du fond et réintroduits dans la colonne d'eau.

• l'arrachement de blocs de vases : l'érosion d'une vase consolidée nécessite une contrainte critique de cisaillement au fond, plus importante. Ce type d'érosion est à l'origine des galets mous (mud balls) et des plaques d'arrachement, ces dernières étant favorisées par les niveaux de sables interlités et les fentes de retrait (Fig I-28).



Figure I-28 : Exemples d'érosion à la surface de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine après une période de tempête.
(A) : Galets mous (10 cm de diamètre),
(B) : Plaques d'arrachement (diamètre de 1 m).

D'autres mécanismes sont identifiés au sein des milieux intertidaux (Black et al., 1998 ; Whitehouse et al., 2000a, Winterwerp et Van Kesteren, 2004) :

• La bio-stabilisation (Fig. I-29) : certains processus biologiques permettent de stabiliser le sédiment (Frostick and McCave, 1979 ; Grant and Gust, 1987 ; Dade et al., 1990 ; Paterson, 1997 ; Widdows et al., 2002, Friend et al., 2005). Le piégeage du sédiment par la végétation au niveau du schorre est significatif (Stumpf, 1983) : la majorité du sédiment transporté au niveau du schorre est piégé, seules les périodes d'agitation permettent un remaniement du sédiment (Petchick et al., 1990 ; Paterson et Black, 1999 ; Widdows et Brinsley, 2002). Sur la slikke, la sécrétion d'E.P.S (Extracellular Polymeric Substances) par les organismes (micro-algues, bactérie, microfaune), entraînent une meilleure résistance des vasières intertidales à l'érosion (Paterson, 1997 ; Decho, 2000 ; Tolhurst et al., 2002). Paterson (1997) en se basant sur une synthèse bibliographique⁴, indique que la stabilisation du sédiment cohésif est en grande partie contrôlée par les organismes interviennent également dans les processus de biostabilisation (Austen et al., 1999 ; Andersen, 2001 ; De Deckere et al., 2002).





Dans une moindre mesure, une biodéstabilisation peut intervenir sur les vasières intertidales (Fig. I-29). Elle est à mettre en relation avec les mécanismes d'affouillement et les terriers qui ont tendance à augmenter la sensibilité du sédiment à l'érosion (Eckman, 1981). La production de pelotes fécales et de pseudo faeces peuvent également être à l'origine d'une diminution de la cohésion du sédiment (Young et Southard, 1978, Widdows et al., 2002).

• La bioturbation : Ce terme générique correspond au remaniement du sédiment par les organismes. En milieu intertidal, le sédiment est souvent présent sous forme de lamines, correspondant à

⁴ Holland et al., 1974 ; Rhoads et al., 1978 ; Parchure, 1984 ; Black, 1992 ; Yallop et al., 1994

différents types d'épisodes de mise en place ou d'évènements. La bioturbation a tendance à homogénéiser le sédiment et en particulier ré-oxygéner les zones anoxiques un peu plus profondes. Ces mécanismes ont aussi tendance à diminuer la cohésion du sédiment en le déstructurant (Meadows and Meadows, 1991 ; Andersen et al., 2002).

• La biodéposition : Ce terme désigne les effets de la vie dans la production de mucus, en favorisant l'agrégation des particules dans la colonne d'eau (Wells, 1987 ; Van Leussen, 1988 ; 1997, Andersen, 2001) ; ce facteur revêt de l'importance dans les taux de sédimentation des sédiments cohésifs, principalement.

Les impacts significatifs des organismes sur les sédiments cohésifs ont démontré dans des environnements possédant un faible marnage (en particulier la mer des Wadden). En revanche, Mitchener et O'Brien (2001) n'ont pas trouvé de relation entre la teneur en EPS et la stabilité du sédiment de la vasière intertidale de l'estuaire macrotidal de la Severn. Selon Winterwerp et Van Kesteren (2004), il semblerait que la dynamique de marée dans cet estuaire macrotidal domine les effets biologiques.

• Les cycles d'émersion/immersion : Par définition, les milieux intertidaux sont soumis à un cycle d'émersion/immersion au cours de chaque marée semi-diurne. Ce processus modifie la pression d'eau et les échanges du sédiment avec l'eau interstitielle. De plus, en fonction de la vitesse de l'immersion, une remise en suspension plus ou moins importante peut être générée. Ces processus entraînent également des variations de la cohésion du sédiment (Amos et al., 1988 ; Paterson et al., 1990).

• L'évaporation/drainage : l'évaporation induit une diminution de la teneur en eau du sédiment à la surface de la vasière et une augmentation de la salinité dans l'eau interstitielle. Le drainage dans le sédiment entraîne également une diminution de la teneur en eau du sédiment, qui a pour conséquence une augmentation de la résistance à l'érosion.

• La dessiccation : lorsque l'assèchement de la surface de la vasière est importante (notamment en période de morte-eau), la cohésion du sédiment est importante. Toutefois, les fentes de dessiccation (Fig. I-30) sont susceptibles de favoriser l'érosion de la surface de la vasière en initiant des surfaces de décollement.



Figure I-30 : Fentes de dessiccation à la surface de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine

• La pluviosité : la pluie peut modifier la cohésion des sédiments de surface des vasières intertidales, l'impact des processus atmosphériques étant plus grand lorsque la surface de la vasière est découverte. Malgré les travaux de Voulgaris et Meyer (2003a), l'impact des processus atmosphériques reste mal connu.

• Les périodes de gel/dégel : la formation de glace à la surface de la vasière induit une diminution mécanique de la résistance à l'érosion par les vagues ou le courant. Peu d'études recensent l'effet de la formation de la glace sur le fonctionnement morphosédimentaire des vasières intertidales (Dionne, 1984 ; 1988). Toutefois, grâce à une étude sur la mer des Wadden, Pejrup et Andersen (2000) précisent que ce processus n'est pas négligeable dans le transport sédimentaire.

• La morphologie de la surface : la forme de la surface de la vasière peut jouer un rôle sur l'hydrodynamisme et donc sur les processus sédimentaires au sein des vasières intertidales. Selon Dyer (1998) et Whitehouse et al. (2000b), quatre ensembles morphologiques peuvent être distingués sur les vasières intertidales (Fig. I-31):

- les falaises (Verger, 1968),
- les chenaux, les criques et les gouttières (Lesourd et al., 2003),
- les systèmes en « ridge and runnels » (banquettes et sillons⁵ ; Bassoullet et al., 2000)
- les « microtopographies » (e.g. rides)

Par exemple, les structures de type « ridge and runnels » fonctionnent différemment d'un point de vue sédimentaire (e.g. : Bassoullet et al., 2000). De même, les falaises et les chenaux transverses qui morcellent de nombreuses vasières intertidales (Verger, 1968), jouent un rôle important d'un point de vue hydrodynamique et sédimentaire (Lesourd et al., 2003).

⁵ Différentes terminologies ont été utilisées en français pour décrire cette morphologie, la terminologie anglaise a été utilisée.



Figures I-31 : Exemples d'éléments morphologiques de la surface de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine.

(A) : Falaise à l'extrémité de la vasière (1 m de haut),
(B) : Chenaux transverses au niveau de la slikke (0,3 à 5 m de profondeur),
(C) : Structures en « ridge and runnels » (50 cm à 1 m de longueur d'onde ; photo : S. Lesourd).

1.3.1.2.2. Etat des connaissances sur les vasières intertidales

Pour cette étude, seront considérées sous la dénomination « court-terme », les mesures réalisées de l'échelle du cycle semi-diurne à l'échelle du cycle lunaire de marée. A ces échelles de temps, la compréhension de ces processus s'est longtemps heurtée au manque d'instrumentation adaptée à des mesures fiables à haute résolution et haute fréquence (Uncles, 2002 ; Lawler, 2005). Toutefois, grâce au développement des techniques d'acquisition automatique, des études récentes ont permis de mieux comprendre l'évolution des vasières intertidales à ces échelles de temps.

En se basant sur des études au cours de cycles semi-diurnes sur l'estuaire de la Severn (Grande-Bretagne), Whitehouse et Mitchener (1998) ont montré que les mécanismes de dépôt-érosion peuvent être mis en relation avec l'agitation. Les périodes de temps calme correspondent à des périodes de dépôt ou d'érosion de l'ordre de 1 cm et les périodes de houle correspondent à des érosions de 1,5 à 5 cm. Cette même étude, suppose que le dépôt est plus important en vives-eaux, en lien avec un apport de MES plus important à cette période. Toutefois, Whitehouse et Mitchener (1998) soulignent que la période de morte-eau coïncide avec une période d'agitation. En raison du nombre de processus à prendre en compte, il est donc nécessaire de multiplier les études à court terme, afin d'obtenir l'ensemble des contraintes hydrodynamiques.

Les travaux de Christie et al. (1999), démontrent également le rôle prépondérant du vent (intensité et direction) et du cycle de marée lunaire dans le transport cross-shore des sédiments intertidaux de la vasière d'embouchure de l'Humber (Grande-Bretagne). Ces auteurs indiquent que pour ce site, les apports du fleuve et la saisonnalité sont d'importance secondaire dans les transports sédimentaires.

Les travaux de Bassoullet et al. (2000) sur la vasière de Marennes-Oléron (France), ont montré le rôle antagoniste entre la remise en suspension des sédiments fins au cours des périodes de vent et les apports de MES par la marée. Ainsi, cette vasière présentant une morphologie de type «*ridge and runnels* » est

particulièrement sensible aux vagues. Elles conduisent à un transport offshore du sédiment, par opposition aux courants de marée, qui engendrent un transport onshore. Selon ces auteurs, un quasi-équilibre de cette vasière est atteint à l'échelle annuelle.

O'Brien et al. (2000) présentent une étude des mécanismes et une quantification de phases de dépôt et d'érosion sur l'estuaire de la Severn à la fois à long terme (suivi de 2 années à faible résolution) et à court terme (haute résolution). Un modèle conceptuel de fonctionnement sédimentaire de cette vasière a été proposé à l'échelle saisonnière. Ces auteurs soulignent que l'évolution des vasières intertidales est gouvernée par des processus épisodiques ou aléatoires, à différentes échelles de temps emboîtées, pouvant entraîner une modification de la vasière d'un jour à l'autre. Sur cette vasière, les variations topographiques annuelles sont comprises entre 10 et 25 cm, et un stockage maximal de l'ordre de 200 000 tonnes a été estimé.

Ces travaux à court terme au sein d'estuaires macrotidaux soulignent le rôle de l'hydrodynamisme, et plus particulièrement l'agitation par les vagues, sur le fonctionnement et sur la morphologie des vasières intertidales estuariennes. Par ailleurs, de nombreux travaux examinent le transport sédimentaire au sein de milieux microtidaux. Dans ces milieux, le rôle des périodes d'agitation (Andersen et Pejrup, 2001), l'impact des processus biologiques (Andersen, 2001 ; Andersen et al., 2005) et la morphologie de la surface sont prépondérants (Pejrup et Andersen, 2005) ; l'action de la marée est limitée.

L'approche à « long terme » s'attache principalement aux variations du fonctionnement hydrosédimentaire des vasières intertidales à l'échelle annuelle. Différents mécanismes ont été identifiés comme étant responsables de ce type de variation à l'échelle annuelle. Les variations de biomasse, enregistrées au cours de l'année, peuvent gouverner l'évolution de la contrainte critique d'érosion. Deux tendances ont été identifiées par les auteurs :

• Une sédimentation préférentielle en hiver, et une érosion liée à une augmentation de la bioturbation au cours de la période estivale entraînant une diminution de la cohésion du sédiment et favorisant l'érosion (Andersen et al., 2005).

• Une sédimentation préférentielle en été, et une érosion en hiver associées à une augmentation de la biomasse en été entraînant une augmentation de la cohésion du sédiment au cours de cette période (e.g. : Frostick et McCave, 1979 ; Yallop et al., 1994 ; Andersen et Pejrup, 2001). De plus, l'impact de la biodéposition a également été démontré par Andersen (2001).

La houle peut également entraîner une saisonnalité marquée avec une érosion plus importante en hiver (e.g. : West et West, 1991 ; Kirby, 1993 ; Bassoullet et al., 2000 ; Andersen et al., 2002). Parallèlement, l'augmentation de la température en période estivale favorise une meilleure cohésion du sédiment (Amos et al., 1988 ; Paterson et al., 1990). Enfin, la remontée du bouchon vaseux au sein de

l'estuaire en période de faible débit est responsable, selon Bale et al. (1985), d'un fonctionnement saisonnier des dépôts dans l'estuaire de la Tamar (UK).

L'étude du fonctionnement sédimentaire des vasières intertidales, a été en général suivie selon deux stratégies d'étude : une étude des mécanismes à court terme et haute résolution ou un suivi du fonctionnement saisonnier avec une quantification à long terme à une faible résolution. Certains auteurs ont combiné ces deux approches (e.g. Shi et Chen, 1996 ; O'Brien et al., 2000 ; Andersen et Pejrup, 2001). D'autres part, les données de dynamique actuelle ont été comparées, par certains auteurs aux données géochimiques sur les carottes sédimentaires (Gouleau et al., 2000 ; Cundy et al., 2005b).

1.3.1.2.3. Classification des vasières intertidales

La classification des vasières intertidales a été proposée par Dyer et al. (2000a). Cette classification s'appuie sur les travaux de typologie des vasières intertidales (Dyer, 1998). Cette typologie est basée sur l'amplitude de la marée, l'énergie des vagues, la pente, le type de sédiment, le type de faciès et la biologie (Fig. I-32). Les paramètres hydrodynamiques (amplitude de marée, exposition au vent), morphologiques (pente) et les caractéristiques du sédiment (densité sèche) de 18 estuaires du Nord-Ouest de l'Europe ont été analysés pour établir cette classification.



Figure I-32 : Classification des vasières intertidales (d'après Dyer et al., 2000). LS : pente faible ; VS : pente moyenne ; VSS : pente forte

Cette classification proposée par Dyer et al. (2000a) est la seule existante pour les vasières intertidales. Toutefois, cette dernière est finalement peu utilisée dans les travaux de recherche internationaux.

2. **PROBLEMATIQUE ET STRATEGIE D'ETUDE**

2.1. Objectifs

Le rôle des vasières intertidales dans les transports sédimentaires à l'échelle d'un estuaire est important (e.g. Lesourd, 2000 ; O'Brien et al., 2000). En raison de l'affinité des particules fines pour les contaminants organiques ou inorganiques, l'étude des vasières intertidales se révèle primordiale dans la connaissance du fonctionnement d'ensemble d'un système estuarien, d'un point de vue sédimentaire, chimique ou biologique. En raison de la difficulté des travaux sur les sédiments cohésifs et du nombre de forçages, les processus de transport sédimentaire dans les milieux estuariens ne sont que partiellement compris. La compréhension du fonctionnement des vasières intertidales nécessite alors de prendre en compte simultanément des échelles de temps variables : de l'échelle du cycle de marée semi-diurne à l'échelle annuelle. En raison de l'extrême complexité des processus liés aux particules fines, une étude des processus à haute résolution est nécessaire.

Dans la littérature, la majorité des études se sont soit concentrées sur les processus par le bais d'études à haute résolution et court terme, soit par une quantification des processus à différentes échelles de temps, de l'échelle du cycle de marée lunaire à l'échelle annuelle. L'une des principales raisons de ces limites est l'absence d'instrumentation capable de permettre un suivi à long terme et haute fréquence. La plupart des études se sont concentrées sur le fonctionnement des vasières à l'embouchure des estuaires, et malgré quelques exceptions (e.g. Dyer et al., 2000 ; Uncles et al., 2002), ces études ne comparent pas le fonctionnement de différents systèmes.

Ce travail a pour objectif de comprendre et quantifier les transferts sédimentaires au sein des vasières intertidales à haute résolution, haute fréquence et long terme. Les différentes étapes effectuées dans cette étude sont :

• Développer et valider une stratégie originale adaptée aux suivis haute résolution, haute fréquence et long terme des paramètres sédimentaires et hydrodynamiques. La calibration de l'instrumentation acoustique déployée sur les sites d'études sera discutée.

• Comprendre le rôle des vasières dans la partie fluviale des estuaires macrotidaux et quantifier les taux de sédimentation/érosion, en lien avec les processus hydrologiques et hydrodynamiques (marée, débit fluvial et batillage) afin de proposer un schéma de transfert des particules fines et une quantification des masses stockées et relarguées.

• Mettre en évidence les cyclicités de dépôt et d'érosion sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine, en précisant les relations entre la vasière d'embouchure et la dynamique du bouchon vaseux et quantifier les transferts sédimentaires.

• Identifier et comparer les cycles de dépôt/érosion sur des vasières intertidales d'embouchure de trois estuaires macrotidaux en Manche (Authie, Medway et Seine) présentant des caractéristiques

morphologiques et sédimentaires différentes. Les enregistrements acquis à haute résolution par l'altimètre sont comparés aux successions de lithofaciès. Le second objectif de cette partie sera de comprendre les mécanismes de dépôt et d'érosion sur les sites d'étude en fonction des contraintes hydrodynamiques, des apports sédimentaires et des propriétés des sédiments des vasières intertidales.

2.2. Sites d'étude

2.2.1. Comparaison inter estuaire : fonctionnement des vasières aval

Trois estuaires du Nord-Ouest de l'Europe sont étudiés : l'estuaire de Seine (Normandie, France), l'estuaire de l'Authie (Pas de Calais, France) et l'estuaire du Medway (Kent, Grande-Bretagne). Ces estuaires sont macrotidaux et les vasières étudiées se situent dans la partie marine de l'estuaire (à proximité de l'embouchure) sur les zones intertidales envasées, dans la zone de mélange eau douce-eau salée, topographiquement dans la haute-slikke à une altitude similaire sur chacun des sites (de l'ordre de +5-6 m/ 0 CMH^6).



Figure I-33 : Localisation des sites d'étude localisé dans la partie marine des estuaires (modifié d'après Cundy et al., 2005b).

(A) estuaire du Medway (Kent, Grande-Bretagne) ;(B) estuaire de l'Authie (Pas-de-Calais, France, ;(C) estuaire de Seine (Haute-Normandie, France).

⁶ Côte Marines du Havre (soit 4,38 m au dessous du zéro NGF)

L'estuaire du Medway est situé au Sud-Est de l'Angleterre, et correspond à l'un des principaux affluents de la Tamise (Fig. I-33). Cet estuaire est d'une longueur de 40,9 km entre son embouchure et la limite de la marée dynamique située au niveau du barrage d'Allington (Davidson, 1991), il draine un bassin versant de 1 761 km² (Davidson, 1991). Les travaux de Davidson (1991) puis Burd (1992) montrent que l'estuaire couvre une zone de 64,41 km^{2,} dont 10% correspondant aux zones végétalisées, alors que 52% correspondent aux vasières nues et 38% aux zones subtidales. L'estuaire du Medway est macrotidal, l'amplitude de marée étant comprise entre 4,0 et 5,6 m, en morte-eau et vive-eau. Le fleuve a un débit moyen de l'ordre de 35 m³.s⁻¹. L'estuaire reçoit des MES provenant des affluents, du drainage et de l'estuaire de la Tamise, ce dernier mode est limité (Spencer, 2000). A l'échelle pluri-décennale, les processus d'érosion sont dominants pour la plupart des vasières ; toutefois, certaines vasières sont en accrétion (Burd, 1989, 1992 ; Kirby, 1990; Petchnik, 1993; Pye et French, 1993). L'estuaire du Medway semble présenter une évolution classique (Petchick, 1992a, 1992b; Petchick, 1993) : son développement a débuté par une accrétion rapide, suivie d'une longue période de stabilité, marquée par des zones intertidales hautes et incisées par des chenaux (Kirby, 1990). Cette évolution a été fortement perturbée au cours du XIX^{ème} siècle en raison des aménagements, entraînant l'érosion des zones intertidales. Toutefois, les facteurs contrôlant la perte des surfaces intertidales de l'estuaire du Medway sont complexes et divers (Spencer, 2000) : l'élévation du niveau marin (Bird, 1993; Shennan, 1989; Reed, 1990: Barham et Bates, 1991), une augmentation de l'action des vagues (Petchick, 1993), des variations de l'influence de la marée, ou des facteurs anthropiques (dragages, endiguements).



Figure I-34: Photographie de la vasière aval de l'estuaire du Medway.

D'un point de vue sédimentaire, l'estuaire du Medway est un estuaire dont l'évolution morphologique est héritée (endiguements historiques), mais issue aussi de l'activité anthropique récente (activités portuaires et industrielles). Il est canalisé dans la partie amont, et son chenal est dragué à l'aval. Cet estuaire possède deux particularités : l'absence de sables sur les zones intertidales et des remaniements internes des particules fines holocènes (Kirby, 1990 ; Harisson et D'Olier, 1995). Ce faible apport de particules fines marines actuelles favorise l'érosion et le remaniement des vasières intertidales (Reed, 1990 ; Petchick, 1993 ; Bird, 1993 ; Pye et French, 1993). Toutefois à l'embouchure, les zones de schorre et de slikke sont développées et subissent l'action de la marée associée à la houle (Fig. I-34). Le Medway présente des niveaux significatifs de contamination (Wharf et Van der Broek, 1977 ; Van der Broek, 1979 ; Bryan et Langston, 1992 ; Pye et French, 1993 ; Spencer et al., 2000). Parallèlement, le drainage des zones agricoles est également une source de contamination organique (Gough et al., 1994).

L'estuaire de Seine est situé au Nord-Ouest de la France, en Normandie. Cet estuaire est macrotidal, l'amplitude étant comprise entre 5,6 et 8 m à l'embouchure. Il possède un bassin versant d'une superficie de 78 650 km², dont 15% correspond au bassin intra-estuarien. La Seine prend sa source sur le plateau de Langres, sa longueur étant de 776 km, son débit fluvial mesuré au niveau de la limite amont de l'estuaire est important. La moyenne du débit annuel au cours des 50 dernières années est estimée à 450 m³.s⁻¹ (Avoine, 1981). Toutefois, le débit fluvial instantané est extrêmement fluctuant entre les périodes d'étiage (minima de l'ordre de 100 m³.s⁻¹) et les périodes de crue (pouvant atteindre 2 000 m³.s⁻¹). Les MES provenant de l'érosion du bassin versant sont essentiellement apportées durant la crue qui représente 80 % des apports annuels (Avoine, 1981 ; Meybeck et al., 1998). Le régime macrotidal associé à un débit solide important a favorisé la formation d'un bouchon vaseux à l'embouchure (Avoine, 1981 ; Le Hir et al., 2001 ; cf. chapitre I-1.3.1.2). Le fonctionnement de ce bouchon vaseux est bien connu par la mesure et a été modélisé. Le bouchon vaseux est localisé dans la zone d'extension de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine. Les zones intertidales représentent une surface de l'ordre de 25 km² (Delsinne, 2005). L'estuaire de Seine, et son embouchure sont fortement anthropisés. De nombreux travaux ont été entrepris afin de permettre la navigation des bateaux commerciaux jusqu'au port de Rouen (cf. Chapitre I-2.1.2).

L'estuaire de l'Authie est situé au Nord-Ouest de la France, et possède une morphologie typique des estuaires picards (Briquet, 1930) avec la présence d'une barre sableuse à l'embouchure, limitant l'action de la houle dans la baie. Cette flèche sableuse est présente en rive Sud (Fig. I-33), en progression vers le Nord et reposant sur une large plate-forme. La rive Nord est en érosion, avec un recul estimé à 600 m depuis 1878, soit un taux de recul moyen de 5 m.an⁻¹ (Dally, 1955 *in* Dobroniak et Anthony, 2001). La flèche sableuse repose sur une plate-forme sub- à supra-tidale, qui tend à barrer l'embouchure. Cette flèche sableuse est principalement alimentée par les sables issus du transit littoral vers le Nord, le long de la côte. L'étude de l'évolution historique de l'estuaire montre un déplacement de l'estuaire vers le Nord-Ouest (Anthony et Dobroniak, 2000 ; Dobroniak et Anthony, 2001). La côte et les fonds au droit de l'estuaire sont riches en

sables, notamment sous la forme de bancs sableux, dont la répartition est liée à la transgression holocène et à la dynamique tidale actuelle. Ce transport sédimentaire est responsable du comblement sableux des estuaires picards sous la forme de vastes plate-formes.



Figure I-35: Photographie de la vasière aval de la baie d'Authie.

L'Authie, d'une longueur de 98 km, draine un bassin versant de 985 km² (Dobroniak et Anthony, 2002). Le débit du fleuve est faible (moyenne annuelle de l'ordre de 10 m³.s⁻¹) et correspond à la seule source sédimentaire montrant un transport amont-aval, les sédiments transportés en suspension étant uniquement fins (Dobroniak et Anthony, 2001). L'embouchure de l'estuaire est large et étendue, le domaine intertidal est estimé à 3 km² (Dobroniak et Anthony, 2001). Cet estuaire est macrotidal, avec des amplitudes de marée comprises entre 4,9 et 8,5 m, respectivement en morte-eau et vive-eau. Ces marnages diminuent rapidement au sein de l'estuaire : à 7 km de l'embouchure, les marnages ne sont plus respectivement que de 1,8 et 4 m, la limite de l'influence tidale se situe à 16 km de l'embouchure en période de vive-eau (Dobroniak et Anthony, 2002). 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.

A l'arrière de la plate-forme sableuse se situent les zones d'accumulation vaseuses. Les zones envasées sont de surface réduite, toutefois, le schorre est bien développé dans la partie interne de l'estuaire (Fig. I-35). D'un point de vue morphologique et comparativement aux estuaires du Medway et de la Seine, l'estuaire de l'Authie est moins anthropisé, malgré les travaux historiques de poldérisation et de constructions de défenses.

	Seine	Medway	Authie
Débit liquide fluvial (m ³ .s ⁻¹)	450 (100-2000)	35	10
Débit solide annuel (tonnes.an ⁻¹)	800 000	?	?
Amplitude du marnage à l'embouchure (m)	5,6 à 8,5 m	4,0 à 5,6 m	4,9 à 8,5 m
Surface du bassin versant (km ²)	78 650	1 761	9 859

Tableau I-A : Comparaison des conditions hydrologiques et hydrodynamiques dans les estuaires étudiés

2.2.2. Sites intra-estuariens : l'exemple de l'estuaire de Seine

De nombreuses études ont été menées sur l'estuaire et la baie de Seine, sur l'hydrodynamisme et le transport sédimentaire, du bassin versant jusqu'à la baie de Seine. Depuis 1995, les travaux sur l'estuaire de Seine se sont intensifiés, en raison de la mise en place du programme pluridisciplinaire Seine-aval.

La limite géographique amont de l'estuaire de Seine se situe au niveau du barrage de Poses, limite artificielle de la propagation de la marée dynamique (Fig. I-36). La limite aval de l'estuaire de Seine varie selon les auteurs, la limite à 32 de salinité (limite d'un estuaire selon la classification de Pritchard (1967) est cohérente selon les données acquises. Cette limite est variable au cours du temps, Avoine (1981) et Lafite (1990) ont montré que la variabilité d'expansion du panache d'eau douce est importante au cours de l'année, associée notamment en crue à l'expulsion du bouchon vaseux. Cette limite semble également cohérente avec les données du modèle numérique concernant l'évolution du bouchon vaseux de Seine (Le Hir et al., 2001). Dans cette configuration, la longueur de l'estuaire est de 165 km.



Figure I-36 : Localisation des sites d'études dans l'estuaire de Seine (d'après Guézennec, 1999).

L'une des caractéristiques de l'estuaire de Seine est une pression anthropique forte, notamment depuis le début du XX^{ème} siècle. Plusieurs études ont montré l'impact des travaux d'aménagements et de leurs conséquences (Avoine, 1981 ; Guézennec 1999 ; Lesourd 2000 ; Delsinne, 2005). Le but principal de ces aménagements est l'amélioration des conditions de navigation maritime et fluviale, notamment pour permettre aux bateaux commerciaux de rejoindre le port de Rouen. En effet, au milieu du XIX^{ème} siècle, la Seine était un fleuve large et peu profond, marqué par de nombreux méandres divagants et de nombreuses îles divisant son cours en plusieurs bras. Les premiers grands travaux d'aménagement datant de 1846, principalement dans la partie amont se sont par la suite intensifiés et déplacés vers l'aval avec le prolongement du chenal de navigation vers la mer et avec l'extension du port du Havre (Lafite et Romaña, 2001).

A l'amont de Rouen, les aménagements ont été moins nombreux : rectifications de chenaux, raccordements d'îles, endiguements ponctuels, remblaiements et aménagements des berges. Le barrage de Poses a été mis en service en 1885, il devient alors la limite amont de la marée dynamique, sur lequel l'onde de marée est réfléchie. Cette zone de l'estuaire est caractérisée par : un chenal peu profond (-4 m CMH au maximum) permettant uniquement la navigation de faible tirant d'eau (barges et péniches commerciales) et la présence d'îles maîtrisées et pérennes (Porcher, 1977 et Figure I-33).

Dans la zone Rouen-Tancarville, les premiers travaux de dragages datent de 1861 : des digues sont construites de manière systématique afin de mettre en place un chenal unique, et d'augmenter le potentiel érosif de ce chenal. L'approfondissement du chenal est réalisé et les seuils éliminés, font disparaître le mascaret. La morphologie actuelle de l'estuaire dans cette zone est un chenal unique d'une largeur navigable de l'ordre de 120 m (d'une largeur d'écoulement variant entre 200 à 500 m), et d'une profondeur de tirant d'eau de 10,30 m.

Dans la partie aval de l'estuaire, les premiers travaux datent du milieu du XIXème siècle. Avant cette époque, l'estuaire sauvage présente un chenal divagant associé à de nombreux bancs de sables, le chenal d'accès à Rouen ayant, selon Migniot (1991), une profondeur comprise entre 4,3 m (vive-eau) et 1,8 m (morte-eau). Depuis 1848, de nombreux travaux ont permis de modifier cet estuaire sauvage en estuaire dit construit. Ces travaux consistent en des endiguements dans la partie amont de cette zone et des dragages de seuils. A partir du début du XX^{ème} siècle et jusqu'en 1980, les digues submersibles Nord et Sud sont prolongées jusqu'à l'aval de Honfleur.

Les conséquences morphosédimentaires des aménagements ont été synthétisées par Avoine (1981) puis Lesourd (2000) :

• La réduction du volume de l'estuaire. Les endiguements ont entraîné une considérable réduction des sections de l'estuaire. Avoine (1981) a estimé que le volume de l'estuaire est passé de 2.10⁹ m³

en 1677 à 840.10⁶ m³ en 1978. La réduction est de l'ordre de 2,6.10⁶ m³.an⁻¹ pour la période 1677-1834, et de $5,3.10^6$ m³.an⁻¹ pour la période 1834-1978, le volume oscillant⁷ passant de 870.10⁶ m³ en 1834 à 220.10⁶ m³ en 1980.

• La réduction des surfaces intertidales. En 1677, la superficie des zones intertidales est de 140 km², diminuant à 130 km² en 1834. A partir de la période de l'estuaire construit, une diminution drastique a été observée : 52 km² en 1962, 31 km² en 1978 et 29 km² en 1992. A titre d'exemple, la zone de slikke de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine est passée de 10 km² en 1974 à 3,2 km² en 1999 (CSLHN, 1999), accentuée par une progression de la zone de schorre sur les zones intertidales (Lesueur et Lesourd, 1999).

• L'établissement de trois chenaux à l'embouchure. La mise en place des digues submersibles a forcé la stabilisation de trois chenaux à l'embouchure de l'estuaire de Seine : le chenal de flot Nord et le chenal de flot Sud et le chenal central, qui est dragué régulièrement pour sécuriser la navigation (chenal de jusant).

• L'évolution de la bathymétrie. Les aménagements dans l'estuaire de Seine ont entraîné une migration vers l'aval du bouchon vaseux (Avoine, 1981) et le déplacement de la sédimentation vers l'embouchure, associé à une migration des chenaux Nord et Sud (Lesourd, 2000). Cette évolution est à mettre en relation avec le comblement de l'estuaire à l'amont de Honfleur, associé aux endiguements et à la zone de dépôt de dragage du Kannick située en baie de Seine.

Les sites choisis pour cette étude se situent le long de l'estuaire de Seine, de l'estuaire fluvial à l'estuaire marin. Des suivis à long terme ont été effectués sur les vasières de Oissel, du Trait et sur la vasière Nord (Fig. I-36 ; Deloffre et al., 2005a ; 2005b).

• <u>La vasière de Oissel :</u> Elle se situe à 130 km de l'embouchure de l'estuaire dans la partie fluviale de l'estuaire, soumise à la marée dynamique en zone d'eau douce. Elle se situe dans une zone d'élargissement du chenal de Seine, et repose sur une ancienne banquette de tufs carbonatés. Sur cette vasière, le schorre est d'extension limitée, essentiellement composé par des phragmites et roseaux (Fig. I-37). L'origine de la vasière remonte aux années 1981-1982, son développement est due aux travaux d'aménagements réalisés en amont. Les travaux de dragages et de remblaiement d'îles ont créé une zone abritée des courants favorable au dépôt des sédiments fins. A l'heure actuelle, elle représente la plus grande surface de vasière dans la partie fluviale de l'estuaire, avec une superficie de 9 500 m². La vasière de Oissel a fait l'objet, d'études sédimentaires (Grün, 1997 ; Guézennec, 1999) et nous l'avons choisie comme site représentatif du domaine fluvial de l'estuaire de Seine. Guézennec (1999) a montré qu'elle est représentative d'un fonctionnement en by-pass des processus de transfert des particules fines du bassin versant vers

⁷ Le volume oscillant correspond à la masse d'eau qui, dans un estuaire, traverse sa section aval et se déplace alternativement vers l'amont puis vers l'aval sous l'influence de la marée

l'estuaire marin. Cette étude a montré que les particules fines sont stockées en période de crue, une partie des particules provenant du bassin versant étant piégées à l'amont de Rouen puis progressivement relargués en étiage vers l'aval. Cette vasière de Oissel a donc été choisie pour notre étude comme site représentatif de l'estuaire fluvial.

OISSEL



La site du Trait (Malaquis⁸). Elle se situe à 65 km de l'embouchure, dans la zone d'eau douce soumise à la marée, et se situe actuellement à proximité du point caractéristique de l'estuaire de Seine (Fig. I-36). Lesourd (2000) recense en 1998 la présence de « vase molle homogène et très fluide en surface » sur une épaisseur de 1,60 m. L'objectif de cette étude est de tester la réponse de l'altimètre au sein d'une vasière intertidale présentant une vase fluide en surface.

• <u>La vasière Nord.</u> La vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine (vasière Nord) constitue la plus grande surface de stockage des sédiments fins de l'estuaire de Seine (3,2 km² de slikke). Elle représente un reliquat de la « Grande Vasière » de « l'estuaire sauvage ». En raison des aménagements successifs, particulièrement importants à l'embouchure de l'estuaire, elle est sujette à une continentalisation importante. Hoyez et Cuvilliez (2000) ont montré que la limite entre le schorre et la slikke progresse vers le sud, entraînant une réduction drastique de la surface de la vasière nue ; récemment cette tendance s'est encore accrue en raison des travaux d'aménagement liés à Port 2000. Selon les travaux de la CSLHN (1999) la réduction de la slikke a été de l'ordre de 35% entre 1974 et 1999, cette surface est actuellement de l'ordre de 3,2 km².

⁸ Suivant les auteurs, des sites identiques peuvent avoir des noms variables. Pour ce travail, le site d'étude est nommé suivant la commune la plus proche.

Selon Hoyez et Cuvilliez (2000), Lesourd (2000), et Cuvilliez (2003), la vasière peut être divisée en deux ensembles morphosédimentaires. La partie externe de la vasière est caractérisée par la présence d'une digue en crochet contre laquelle se développent des faciès de sables fins transportés (Lesourd, 2000), par les vagues ou le vent. La partie médiane de la slikke est composée d'une alternance de vases molles, riches en eau, et de niveaux sableux. Enfin la partie basse est composée de sables thixotropiques modelés en mégarides d'amplitude décimétrique et de longueur d'onde métrique. La partie interne présente un schorre développé dont la végétation est étagée, la zone de la slikke est entaillée par des chenaux transverses méandriformes et ramifiés (Fig. I-38A) pouvant atteindre 30 m de large à leur embouchure et 1 à 3 m de profondeur. Dans la partie basse de la slikke, Lesourd et al (2003) ont montré que ces chenaux transverses, sont vides au cours de la période de crue (Fig. I-38B), mais stockent du matériel fin sous forme de vases molles en période d'étiage (Fig. I-38C).



Figure I-38 : Photos des chenaux transverses de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine.

(A) : Morphologie des chenaux
(photo : A. Cuvilliez),
(B) et (C) : Photo du remplissage et de la vidange des chenaux (Lesourd et al., 2003).

Cette partie de la vasière est principalement composée de vases, interlitées avec de fins niveaux sableux. Aux abords des chenaux transverses se développent des lobes sableux. Les faciès évoluent rapidement en surface, en fonction des variations saisonnières, des conditions hydrodynamiques, météorologiques (notamment au cours de la période de découvrement) et biologiques. A titre d'exemple, les structures en «*ridges et runnels* » recensées par Lesourd en 2000 comme un faciès caractéristique de la basse slikke, n'ont pas été observé au cours de cette étude. De nombreux faciès sédimentaires sont observés à la surface de la vasière (Hoyez et Cuvilliez, 2000 ; Lesourd, 2000 ; Cuvillez, 2003).

Comparativement aux autres sites d'étude, l'étendue de la vasière Nord est importante, avec des différences notables de morphologie. Dans la zone aval de la vasière, la houle est prédominante (Da Silva, 2002), et dans la zone amont, une source sédimentaire importante est présente en période d'étiage : la vase fluide dans les chenaux transverses. Les nombreux travaux sur ce site ont permis de mettre en place une stratégie d'étude spécifique, afin de prendre en compte de possibles variations spatiales de l'évolution de cette vasière. L'étude de l'évolution morphosédimentaire de cette vasière durant 3 années a permis de mettre en évidence de faibles variations d'altitude dans la partie haute de la slikke (Lesourd, 2000), et des variations importantes dans la partie basse. Pour cette raison la station de référence a été choisie dans la zone des chenaux (Fig. I-38), comme représentative d'un comportement moyen sur une radiale transverse (Fig. III-2).

• Le site de Pennedepie. Le site de Pennedepie est situé à l'embouchure de l'estuaire de Seine (Fig. I-36). Durant les 25 dernières années, les observations ont montré un déplacement de la sédimentation vers l'aval de l'estuaire (Avoine, 1995 ; Avoine et al., 1996 ; Lesueur et al., 1997 ; Lesourd et al., 2001), avec des dépôts de vases se situant désormais dans les petits fonds subtidaux de l'embouchure, espace soumis à de « fortes » conditions hydrodynamiques marines (forts courants de marée, houles et clapots). Les apports sont liés aux périodes de très fortes crues : les « crues estuariennes » (Lesueur, 2001 ; Garnaud, 2003). Depuis plusieurs années, il semble que les plages du littoral du Calvados soient le siège, plus fréquemment que par le passé, d'envasements d'importance très variable selon les sites et les saisons. Il s'agit soit de dépôts massifs pluri-centimétriques, ou de placages vaseux piégés dans des creux de rides observés en moyenne et basse plage. L'objectif de l'étude sur ce site est de tester la réponse de l'altimètre au sein d'un environnement qui présente une surface d'une granulométrie (i.e. sable, vase ou mélange) variable au cours du temps.

2.3. Matériel et méthodes

Le suivi à long-terme est basé sur le déploiement d'un altimètre durant au moins une année (Fig. I-39) et d'une campagne de terrain tous les deux mois pour chacun des sites. Ce suivi à long terme est complété par des études à court terme (cycle de marée semi-diurne, semi-lunaire ou lunaire) à une cadence d'échantillonnages plus serrée, tant sur les mesures physiques que sur les prélèvements.



Figure I-39 : Les périodes d'étude sur les différentes vasières intertidales. Données SNS ⁹

La période d'étude est caractérisée par la décroissance de l'importance des crues de 2001 à 2005, en terme de durée et d'intensité (Fig. I-39). En Seine, les principales conséquences sédimentaires et hydrodynamiques de cette décroissance sont la diminution du stockage intra-estuarien et l'expulsion limitée du bouchon vaseux en période de crue en baie de Seine. Cette étude permet donc de compléter les études sur la dynamique des particules fines dans l'estuaire de Seine (Guézennec, 1999 ; Lesourd, 2000 ; Garnaud, 2003) effectuées en période d'accroissement du débit fluvial.

2.3.1. Mesures des paramètres sédimentologiques, lithologiques et rhéologiques

Au cours des campagnes de terrain, une carotte courte (10 cm de diamètre, 30 cm de long) est prélevée à la main, ainsi que le premier centimètre du sédiment de surface. Les principaux paramètres sédimentologiques ont été analysés. La granulométrie des sédiments est analysée grâce à un granulomètre laser Beckman COULTER LS 230, suivant un large spectre de la gamme des argiles aux sables (0,04 à 2 000 μ m). Il apparaît donc bien adapté pour l'étude des vasières intertidales, présentant souvent un mélange vaso-sableux. La teneur en matière organique a été estimée par la technique de la perte au feu à 520°C (Whitehouse et al., 2000a), alors que la teneur en carbonates est quantifiée grâce à un calcimètre Bernard.

Les propriétés rhéologiques du sédiment ont été mesurées par la teneur en eau du sédiment, paramètre étroitement liée à l'état de consolidation du sédiment (Gouleau, 1975, 1976 ; Uncles et al., 1998). Le sédiment pré-pesé est séché à 45° dans une étuve durant une semaine, puis placé au dessiccateur durant 24h, il est alors à nouveau pesé. La teneur en eau est alors calculée suivant la formule suivante :

W%= Masse humide-Masse sèche

Masse sèche

⁹ SNS : Service de la navigation de la Seine

Ce paramètre varie pour les sédiments de surface des vasières intertidales entre 50 et 250%. Il est lié à la granulométrie et croissant avec le pourcentage d'argiles. Il est aussi influencé par les périodes de dépôt/érosion, les conditions météorologiques et la profondeur d'enfouissement. Les prélèvements du sédiment de surface étant effectués au cours de la période d'émersion, ils sont susceptibles de s'assécher. Pour cette raison, les prélèvements sont réalisés dans les deux heures après l'émersion des sites d'étude. Les variations inférieures à 10% pour un même site ne seront pas discutées dans la suite de ce travail.

Les carottes courtes sont ouvertes au laboratoire afin d'obtenir deux demi-carottes, l'une servant à l'analyse des caractéristiques du sédiment, l'autre servant à la description des faciès, puis gardée en archivage. La demi-carotte servant à l'analyse est découpée avec un pas centimétrique (à l'exception des niveaux sableux, prélevés indépendament), le sédiment ainsi prélevé subit ensuite les analyses identiques à celles décrites pour les sédiments de surface.

La description des faciès de certaines carottes est complétée par une analyse par la technique d'analyse d'imagerie SCOPIX (Laboratoire EPOC, Université Bordeaux I). Une source de rayonnement X fournit des clichés permettant une analyse lithologique fine, avec la mise en évidence d'interlits millimétriques, qui peut être couplée à une analyse granulométrique (Migeon et al., 1999 ; Lofi et Weber, 2001). Cette technique a été utilisée dans les environnements turbiditiques (Mulder et al., 2001), les résultats obtenus sur les vasières intertidales montrent que son utilisation dans ce type d'environnement est appropriée (Balouin, 1998).

2.3.2. Mesures altimétriques

2.3.2.1. Principe de fonctionnement

L'altimètre immergeable ALTUS, développé par l'IFREMER et la société MICREL (Jestin et al., 1998) est fondé sur le principe de l'échosondeur bi-statique¹⁰. L'acquisition est basée sur la mesure du temps de trajet séparant l'émission d'une onde acoustique à 2Mhz par l'échosondeur, de la réception de l'écho renvoyé par une surface. Ce temps de trajet est transformé en distance, la vitesse du son dans l'eau étant fixée pour chaque appareil (1478 m.s⁻¹, correspondant à une eau douce à 19°C). 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. En plus de ces mesures, l'appareil est équipé d'un capteur de pression localisé sur le logger, permettant de connaître la hauteur d'eau sur le site (Fig. I-40A). Le logger contient également la mémoire, permettant l'enregistrement des données et l'alimentation (assurée par 4 piles AA au lithium). La récupération des données se faisant au niveau du logger, par une interface de lecture reliant l'altimètre et l'ordinateur (Fig. I-40A).

¹⁰ Emission et réception sont effectuées sur un émetteur et un récepteur, distincts



Figure I-40 : Photographie de l'altimètre ALTUS. (A) principaux composants, (B) sur son bâti sur la vasière Nord de l'estuaire de Seine.

La mise en place des capteurs est effectuée sur un bâti en aluminium qui a été spécifiquement développé (Fig. I-40B). L'échosondeur est placé sur ce bâti tripode, alors que le logger est placé à la surface de la vasière (Fig.I-40B). Les campagnes de terrain ont montré que la perturbation de la surface de la vasière par le tripode est faible. L'échosondeur est positionné à une distance comprise dans la gamme 20-70 cm (Tableau I-B). Dans cette étude, la mise en place de l'altimètre est effectuée à une hauteur de l'ordre de 20-22 cm en position initiale, ce qui permet de minimiser la perte de signal et d'obtenir un maximum de mesures pour chaque cycle semi-diurne, car l'altimètre doit être immergé pour la mesure. Le signal acoustique est émis suivant un cône vertical dirigé vers le bas de 3°6 de diamètre, la mesure au sol se fait dans un cercle de rayon de 0,1 cm pour une distance entre l'échosondeur et la surface de 20 cm.

Mesure de l'altitude	Gamme utilisée*	20-70 cm	
(Echosondeur à 2 Mhz)	Précision	+/- 0,2 cm	
	Résolution	0,06 cm	
Mesure de la hauteur d'eau	Gamme	0-200 cm	
(capteur de pression)	Précision	+/- 8 cm	
	Résolution	2 cm	

Tableau I-B : Caractéristiques techniques constructeur de l'altimètre ALTUS.

* Deux gammes sont disponibles 20-70 et 70-200 cm, cette dernière ayant une résolution moindre. En pratique, les mesures sont possibles pour une distance minimale (entre l'échosondeur et la surface) de 12 cm.

Pour atteindre les objectifs fixés dans ce travail, le choix de la cadence d'acquisition a été de 1 mesure toutes les 10 minutes. Cette fréquence permet de suivre les processus à l'échelle semi-diurne sur chacun des sites d'étude. Dans cette configuration, la capacité mémoire est de 2 à 3 mois, l'autonomie de la batterie est de 3 ans.

Les courbes de suivis temporel d'altimétrie, présentées par la suite, sont des courbes cumulées des dépôts et des érosions successifs, la première mesure étant considérée comme référence (zéro initial). Enfin, par convention, les courbes croissantes correspondent à des phases de sédimentation et les courbes décroissantes à l'érosion et/ou au tassement. Ce dernier mécanisme est significatif lorsque le dépôt est épais et qu'il s'effectue sous la forme la forme de crème de vase, cas typique de la vasière Nord de la Seine (Deloffre et al., accepté).

2.3.2.2. Mesure de la distance optimale

Le transducteur de l'altimètre ALTUS transforme le temps de trajet entre l'onde émise et l'onde reçue en distance, suivant une valeur constante de vitesse du son dans l'eau. Or en raison des variations de la vitesse du son dans l'eau, générées par les variations de température, salinité et de pression, ces mesures nécessitent d'être calibrées par un traitement post-acquisition. Pour cette étude, les variations de pression sont minimes (profondeur d'eau sur sites de l'ordre de 1 à 5 m) et ne seront pas considérées en raison de leur faible impact sur la vitesse du son dans l'eau.

Afin de calibrer l'impact des variations de température et de pression, une étude en laboratoire a été effectuée dans une cuve expérimentale. L'altimètre est positionné entre 20 et 22 cm du fond de la cuve (identique à la distance initiale lors de la mise en place sur le terrain). Dans le cas de la cuve, la surface de réflexion est une surface rigide, toutefois indépendamment du type de surface, la réponse de l'altimètre par rapport à la variation de salinité dans la masse d'eau est quasi identique (Fig. I-41A).



Figure I-41 : Evolution de l'erreur de mesure de la distance entre la surface et l'échosondeur liée aux variations de la vitesse du son dans l'eau.
(A) en fonction de différents types de fond (distance échosondeur-surface : 30 cm),
(B) en fonction de la distance entre l'échosondeur et la surface (fond vaseux).

La distance entre l'échosondeur et la surface de réflexion influe sur l'erreur induite : plus la distance parcourue par l'écho est faible, et moins les impacts de la salinité et de la température sont importantes (Fig. I-41B).

En général, sur le terrain, l'altimètre sera donc positionné entre 20 et 22 cm de la surface ce qui permet de minimiser les effets de la variation de la vitesse du son dans l'eau, tout en permettant de prévenir les épisodes brusques et intenses de sédimentation, la distance minimale effective de mesure de l'altimètre étant de 12 cm.

2.3.2.3. Impact de la salinité et la température

Les variations des mesures topographiques de l'altimètre en fonction de la température (5-29°C) et de la salinité (0 et 35) sont présentées sur la figure I-42. L'erreur induite par les variations de la vitesse du son dans l'eau est indiquée suivant la vitesse du son initiale de l'altimètre (donnée constructeur : 1478 m.s⁻¹).

L'erreur maximale induite par la variation de la vitesse du son dans l'eau est alors de 1,6 cm (entre une eau douce à 5°C et une eau marine à 28°C). Ces variations extrêmes ne seront que difficilement atteintes sur un cycle d'observation annuel. Les variations de température seront préférentiellement observées à l'échelle annuelle, les variations de salinité concernent préférentiellement les cycles de marée (Tableau I-C).



Figure I-42 : Erreur topographique induite par les variations de la vitesse du son dans l'eau. Comparaison des données théoriques (équation de Coppens) et des résultats expérimentaux.

Les résultats obtenus en laboratoire peuvent être comparés aux formulations théoriques donnant la célérité du son dans l'eau en fonction des variations de température, pression et profondeur (McKenzie, 1981 ; Coppens, 1981 ; Chen and Millero, 1977 ; Del Grosso, 1974 ; Wong and Zhu, 1995). L'équation des variations de la vitesse du son dans l'eau (Coppens, 1981) :

$$C=C(0,S,T)+(16,23+0,253T)Z+(0,213-0,1T)Z^{2}+[0,016T+0,0002(S-35)](S-35)TZ$$
$$C(0,S,T)=1449,05+45,7T-5,21T^{2}+0,23T^{3}+(1,333-0,126T+0,009T^{2})(S-35)$$

Avec Z=profondeur en kilomètres ; S=salinité ; T=t/10, avec t=température en °C.

Limite de validité : température de 0 à 35°C, salinité de 0 à 45, profondeur de 0 à 4 km.

Les variations théoriques de la vitesse du son dans l'eau sont similaires aux résultats de la calibration de l'altimètre au laboratoire (Fig. I-42). La différence entre les deux valeurs est liée à la résolution du capteur (0,06 cm). Cette équation a donc été utilisée afin de corriger les mesures altimétriques obtenues sur le terrain, en fonction des données acquises pas les réseaux estuariens de surveillance (Tableau I-C).

	Echelle de temps	Variation de Salinité	Variation de température (°C)	Erreur induite par les variations de la vitesse du son dans l'eau (cm)
Estuaire de Seine (Aval)	Annuel	10	20	1,3
	Cycle Semi diurne de vive-eau	3	5	0,2
Estuaire de Seine (Amont)	Annuel	0	15	0,7
	Cycle Semi diurne de vive-eau	0	3	0,1

Tableau I-C : Impact des variations de la vitesse du son dans l'eau à différentes échelles de temps basé sur le calibrage de l'altimètre en laboratoire et les données des réseaux de surveillance estuariens

L'impact de ces variations est fonction du site d'étude selon la gamme de température et de salinité, mais également en fonction de l'amplitude des processus de sédimentation et d'érosion : les variations de vitesse du son dans l'eau peuvent être importantes, notamment lorsque les variations topographiques mesurées sont de l'ordre des erreurs induites par les variations de la vitesse du son dans l'eau. La figure I-43 présente les variations topographiques sur l'estuaire du Medway, brutes et corrigées des variations de la vitesse du son dans l'eau.



Figure I-43 : Impact de la variation de la vitesse du son dans l'eau sur les chroniques d'altimétrie de l'estuaire du Medway.

Ainsi, la série brute de données semblait indiquer une tendance annuelle marquée (amplitude de 2 cm), mais cette dernière est réduite (amplitude de 1 cm) une fois les données corrigées et la vasière est quasiment stable. Sur ce site, les effets liés à la variation de la vitesse du son dans l'eau ont engendré une cyclicité annuelle marquée sur les variations topographiques, mais qui correspond en réalité à la variation saisonnière de la température de l'eau.

Toutes les données altimétriques de terrain présentées dans ce document seront donc corrigées des variations de température et de salinité, suivant les données disponibles au niveau des réseaux de surveillance. Toutes les données à long terme ont été corrigées, à l'exception de la baie de l'Authie en raison de l'absence de réseaux de surveillance.

2.3.2.4. Les différents seuils des voies de l'altimètre

L'altimètre ALTUS permet d'enregistrer les variations de distance entre l'échosondeur et la surface suivant 4 voies de réception. L'onde acoustique émise est reçue suivant différents seuils pour chaque voie, ces seuils variant entre 0 et 255 mV. Toutefois, les tests effectués sur différentes surfaces (fond rigide, sable, vase) montrent que la gamme de mesures réellement utilisable est située entre 15 et 180 mV. Quatre voies ont été choisies, réparties sur cette gamme et testées afin de connaître leur réponse en fonction de la nature du sédiment. La configuration des seuils de voies est identique sur chaque altimètre, soit par puissance croissante : 15, 45, 90 et 180 mV. Les résultats obtenus sur ces quatre voies montrent que les variations entre les voies extrêmes permettent d'obtenir des informations sur la nature du sédiment, les voies intermédiaires donnant des résultats cohérents, compris entre les deux voies extrêmes. Les voies intermédiaires n'apportent donc aucune information supplémentaire et seules les voies extrêmes seront utilisées et décrites dans la suite de l'étude. L'utilisation des voies 15 et 180 mV peut s'avérer utile, bien que leur interprétation nécessite des précautions, en raison de variations entre les seuils proches de la résolution de l'appareillage et de la difficulté de travailler dans la couche limite. Toutefois, certains sites d'étude semblent donner des résultats cohérents en fonction des propriétés du sédiment de surface (Bassoullet et al., 2000).



Figure I-44 : Evolution des voies altimétriques au cours du tassement de la crème de vase de l'estuaire de Seine.

Au laboratoire, le suivi du tassement de la crème de vase a été effectué grâce à l'altimètre (Fig. I-44), seules les voies extrêmes sont présentées. La vase fluide (crème de vase), prélevée en estuaire de Seine, a été introduite dans la cuve expérimentale. Le matériel décante et un suivi de l'évolution des variations topographiques est réalisé (Fig. I-44) : la voie ayant un seuil à 15 mV présente un profil stable alors que la voie à 180 mV présente une courbe de type logarithmique typique des processus de tassement. L'interprétation proposée est que la voie à un seuil de 15 mV correspond à une partie du sédiment consolidé, alors que la voie à 180 mV est à l'interface eau-sédiment, et montre le tassement d'une fine couche de vase fluide.

Par la suite, les résultats se référant à une surface topographique unique sont basés sur la voie possédant un seuil de 15 mV, c'est à dire la voie la moins sensible. L'exemple présenté montre la possibilité d'utiliser l'altimètre afin de comprendre les processus à l'interface eau-sédiment. En milieu naturel, les travaux de ce genre sont difficiles à mener et peu nombreux. Les données altimétriques obtenues sur les différents sites permettent pourtant une approche de la compréhension des variations et processus à l'interface eau-sédiment.

La réponse des seuils de voie de l'altimètre est particulièrement sensible à la présence de vase fluide peu consolidée (Fig. I-45), suite à un évènement d'énergie importante (Ross, 1989 ; Maa et Mehta, 1990 ; de Wit et Kranenburg, 1996 ; 1997 ; van Kessel et Kranenburg, 1998). Sur la vasière marine d'embouchure, les vagues générées par le vent entraînent une contrainte de cisaillement au fond importante ($> 1 \text{ N.m}^{-2}$, Verney et al., 2005b). La figure I-47 montre la réponse des seuils de l'altimètre au cours d'un épisode de vent de l'ordre de 13 m.s⁻¹ et de direction Ouest-Sud Ouest (Fig. I-45). Avant cet épisode de vent, les seuils des deux voies altimétriques sont quasiment identiques, alors que pendant l'épisode, le seuil correspondant à la vase fluide n'est pas présent et le seuil correspondant à la vase plus compacte montre une érosion de 1 cm au cours d'un cycle de marée semi-diurne. Au cours de la marée suivante, l'agitation persiste et la vase fluide est en partie détectée. Lorsque l'agitation diminue, la vase fluide se met en place avec une épaisseur de l'ordre de 0,5 cm (différence d'épaisseur entre les deux seuils de voies), progressivement cette épaisseur diminue pour atteindre 0,3 cm (le 05/04/03). Au cours des marées suivantes, la hauteur d'eau sur la vasière est insuffisante (< 20 cm, période de morte-eau) pour permettre un enregistrement de l'altimètre. Finalement, au cycle de marée lunaire suivant, les deux voies sont confondues : la vase fluide est consolidée au cours de la période de morte-eau.



Figure I-45 : Liquéfaction des vases au cours d'un épisode d'agitation : exemple de la vasière Nord de l'estuaire de la Seine.

Un autre exemple de mise en place de vase fluide est présenté sur la figure I-46 correspondant au site du Trait dans l'estuaire fluvial. Dans cette zone de l'estuaire de Seine, le passage de bateaux induit une augmentation des vagues de batillage et une augmentation de l'énergie turbulente entraînant une remise en suspension de la vase de surface, identifiée par l'altimètre. Cette vase fluide est d'une épaisseur de l'ordre de 0,5 cm après le passage du bateau. Cette couche de vase fluide perdure durant 4 cycles de marée après sa formation. Au cours du cycle suivant, cette vase se dépose : les deux signaux de l'altimètre sont confondus. Ce type d'observation a également été effectué par Bassoullet et al. (2000) sur la vasière de Marennes-Oléron.



Figure I-46 : Liquéfaction des vases au cours d'un passage de bateau : cas de la vasière du Trait dans l'estuaire de la Seine.

L'altimètre est donc capable de mettre en évidence l'évolution des propriétés acoustiques du sédiment, notamment lors de la mise en place de la vase fluide par liquéfaction. Toutefois, l'observation du dépôt d'une vase fluide par les différentes voies de l'altimètre est plus complexe. Dans ce cas, l'interprétation des différences entre les seuils de voies est difficile. Une des raisons de cette impossibilité à distinguer la vase fluide au cours du dépôt est la forte concentration de MES dans la colonne d'eau.

2.3.2.5. Utilisation de l'écho max

La valeur de l'écho max. de l'altimètre ALTUS est le niveau maximum du signal acoustique reçu par le transducteur par rapport au signal émis. Il permet de vérifier la validité des mesures. Dans la configuration choisie de l'altimètre, l'échosondeur attend 33 ms avant de mesurer l'écho max. Dans ce cas, les études en laboratoire (Fig. I-43) ont montré que l'écho max. est constant pour des surfaces planes, avec des valeurs de 3,8 à 4 V, qu'il s'agisse de fonds rigides, de surfaces sableuses ou de vaseuses, indépendamment de la granulométrie du sédiment.

Le rôle de la morphologie de surface a été étudié dans un canal à houle et courant en collaboration avec D. Mouazé (UMR CNRS 6143-Université de Caen). La calibration a été réalisée sur l'impact des rides sableuses et la saltation des particules de sables, semblant être à l'origine des variations d'amplitudes de l'écho max (Fig. I-47). Un sable bimodal présentant un mode à 200 et un mode à 700 µm (granulométries dominantes dans l'estuaire aval de la Seine) a été introduit dans le canal. Des conditions de courant et de houle ont été stabilisées dans le canal afin de créer des rides de sable. L'altimètre a été positionné dans le canal à 25 cm du fond, afin de suivre l'évolution morphologique et topographique.



Figure I-47 : Evolution de l'écho max. de l'altimètre au cours du déplacement des rides

Deux périodes de stabilité morphologique ont été observées, à cette période, l'écho max est stable (valeur de 3,5 V). Lorsque le sédiment est en mouvement, l'écho max. varie de façon importante (1,5 à 3,5 V). Les instabilités de l'écho max sur les fonds sableux peuvent avoir différentes origines : la pente liée aux rides, la saltation des particules sableuses, la remise en suspension dans la colonne.

Au cours des travaux entrepris sur la plage de Pennedepie, soumise à un envasement temporaire, la surface de la plage montre une alternance au cours du temps entre vase et sable, les transitions entre ces faciès en surface étant rapides. Au cours de ce suivi, les enregistrements de l'écho max. ont montré des variations significatives, confirmées par l'état de surface de la vasière observée au cours des campagnes mensuelles, ainsi que par les données courantométriques sur le site. Lorsque la surface de dépôt est vaseuse,

l'écho max. est stable avec une valeur de l'ordre de 3,8 V ; lorsque la surface est sableuse, l'écho max. montre des variations d'amplitude comprises entre 1 et 3,8 V (Fig. I-48), identiques à celles observées sur le sédiment en mouvement dans le canal (Fig. I-47).



Figure I-48 : Interprétation des variations topographiques et de l'écho max. de l'altimètre sur le site de Pennedepie.

L'écho max. de l'altimètre permet donc de distinguer les surfaces vaseuses et les surfaces sableuses.

2.3.2.6. Validation des mesures altimétriques par comparaison de techniques

En complément des mesures altimétriques, des mesures par la méthode des piquets en PVC (Bessineton, 1997 ; Grün, 1997 ; Lesourd, 2000) ont été effectuées. Cette technique basse fréquence permet d'obtenir les variations topographiques des vasières intertidales par la mesure de la distance entre le sommet des piquets PVC et la surface de la vasière. Au cours de chaque campagne, quatre mesures sont effectuées, puis moyennées pour chaque station. Ces mesures permettent d'étudier l'évolution morphosédimentaire des vasières intertidales suivant des profils longitudinaux (Fig. III-2). Les mesures effectuées antérieurement sur l'estuaire de Seine ont permis de choisir un site d'implantation des altimètres possédant un comportement moyen le long d'un profil transverse perpendiculaire au chenal de Seine.

La comparaison entre la méthode des mesures piquets et l'altimètre permet de vérifier simultanément la validité de ces deux techniques (Fig. I-49).



Figure I-49 : Corrélation des mesures de la topographie de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine suivant la méthode des piquets et l'altimètre ALTUS

Les mesures topographiques effectuées par ces deux techniques sont corrélées avec une erreur maximale de l'ordre de 1 cm. Cette figure montre également les avantages des mesures altimétriques continues à haute résolution comparée à des méthodes plus classiques effectuées à basse résolution.

2.3.3. Mesures hydrodynamiques/hydrosédimentaires à haute fréquence

Afin de comprendre les relations entre l'hydrodynamique et les transports sédimentaires, le déploiement d'un courantomètre ADV (Acoustique Doppler Velocimeter) NORTEK a été effectué en complément des mesures altimétriques, en collaboration avec R. Verney (UMR CNRS 6143-Université de Rouen). Cet instrument permet de mesurer en un point, la vitesse et la direction du courant à haute fréquence (vitesse d'acquisition maximale de 64 Hz). Il a été choisi en raison de la possibilité de mesurer à haute fréquence et haute résolution les variations des conditions hydrodynamiques à proximité de la surface des vasières intertidales (7cm du fond). L'énergie turbulente atteint des valeurs maximales à proximité du fond, alors que les structures turbulentes sont dissipées dans la colonne d'eau (Simpson et al., 2005). En raison de la fréquence d'acquisition, l'autonomie d'alimentation et de mémoire est limitée, le déploiement de cet instrument s'est fait au cours de périodes courtes (du cycle semi-diurne au cycle semi-lunaire), considérées comme clef de l'évolution des vasières intertidales étudiées, telles que préalablement identifiées par les mesures à long-terme obtenues avec l'altimètre ALTUS.
L'ADV est composé d'un transducteur bi-statique à 6 Mhz émettant une onde acoustique, qui se réfléchit sur les particules en suspension. Le signal renvoyé par les particules est enregistré au niveau de 3 capteurs, ce qui permet de donner la vitesse des particules (en m.s⁻¹) dans la masse d'eau (assimilée à la vitesse de la masse d'eau, dans les 3 dimensions de l'espace, la mesure s'effectuant dans un cube de 0,8cm³). La direction des courants est donnée suivant le système ENU (East-Nord-Up), directement compensée des mouvements de l'appareil grâce à son compas interne. En plus de la mesure des vitesses de courant, l'appareillage permet d'obtenir les variations de température dans la masse d'eau. La hauteur d'eau est acquise par un capteur de pression. L'instrumentation est positionnée sur un bâti en aluminium rigide (Fig. I-50), perpendiculairement au chenal afin de minimiser le bruit généré par le bâti et d'obtenir des mesures les plus adaptées pour la mesure de la turbulence (Kawanisi et Yokosi, 1997 ; Kim et al., 2000 ; Nikora et al., 2002 ; Voulgaris et Meyers, 2004b ; Verney et al., 2005a ; 2005b).



Figure I-50: Photographie de l'ADV et du bâti implanté sur la vasière intertidale de Petiville (estuaire de Seine)

L'ADV permet également l'enregistrement de l'amplitude du signal de retour sur chacun des 3 récepteurs acoustiques. Le rapport du signal sur le bruit (amplitude du signal de retour mesurée par rapport au signal de retour dans de l'eau claire) reflète alors la concentration des particules dans l'eau, qui contrôle en partie l'intensité du signal de retour (Kim et al., 2000). Il est alors possible d'obtenir une relation entre la concentration des particules en suspension et le rapport signal sur bruit donné par l'ADV, cette démarche étant classique pour les instruments océanographiques acoustiques. Toutefois, l'intensité du signal de retour est également fonction de la granulométrie des particules en suspension ; il est donc nécessaire de calibrer l'instrument en fonction de la granulométrie de chaque site d'étude au moment de la mesure (Voulgaris et Townbridge, 1998).

En raison de l'amélioration de la qualité des courantomètres au cours des dernières années, le calcul de la turbulence est rendu possible. Le but de cette étude est de comparer les variations de la topographie de la vasière en fonction des paramètres hydrodynamiques tels que la marée, le vent ou le batillage. Plusieurs

formulations permettent de calculer la turbulence au sein de la masse d'eau, discutées par de nombreux auteurs (Voulgaris et Townbridge, 1998 ; Kim et al., 2000 ; Verney et al., 2005b). La méthode du profil de vitesses logarithmique (LP : Logarithmic profile) est basée sur des vitesses moyennées au cours du temps, donc incompatible avec les objectifs de cette étude (Fugate and Friedrichs, 2002 ; Simpson et al., 2005). La méthode de calcul de la turbulence par la covariance (COV) est basée en partie sur le Reynold shear stress, ne permet pas de séparer la contribution du courant de celle des vagues (Kim et al., 2000 ; Verney et al., 2005b).

Les travaux de Verney et al. (2005a) montre que la turbulence au fond sur les vasières intertidales peut être estimée suivant les méthodes TKE (Total Kinetic Energy Method) et ID (Initial Dissipation Method). Alors que la méthode TKE permet de prendre en compte l'énergie turbulente liée aux courants et aux vagues, la méthode de l'ID prend uniquement en compte l'énergie liée aux courants.

La contrainte critique de cisaillement au fond liée au vagues et au courant est assimilée à τ_{TKE} , alors que τ_{ID} représente la contribution des courants à cette contrainte. Pour cette étude, l'estimation de la turbulence (courant+vagues) sera formulée suivant la méthode du TKE. La formulation du TKE exprime la contrainte de cisaillement comme une fonction linéaire de la cinétique de l'énergie turbulente (Soulsby, 1983 ; Kim et al., 2000 ; Dyer et al., 2004) :

$$\pi_{\text{TKE}} = \rho \ C_{\text{TKE}} \left[0.5 \ (\overline{u^{2}} + v^{2} + w^{2}) \right]$$

 C_{TKE} variant entre 0,19 et 0,21 selon les auteurs, pour cette étude, pour les vasières intertidales étudiées, un coefficient de 0,19 a été utilisé (Verney et al., 2005a).

2.3.4. Données acquises par les réseaux de surveillance des estuaires

Dans la partie aval de l'estuaire de Seine, le réseau MAREL a été mis en place en 1996. Les données utilisées dans le cadre de ce travail proviennent de la bouée de Honfleur, concernant les données physicochimiques dans la colonne d'eau et la bouée de La Carosse concernant les données de vent (Woerther, 1999).

La bouée de Honfleur est localisée dans le chenal central de navigation de l'estuaire de Seine, dans la zone de déplacement du bouchon vaseux. Ces données sont acquises par un pompage de l'eau de surface, analysée ensuite par un turbidimètre d'une précision de l'ordre de 3%, avec une acquisition toutes les 10 minutes (Woerther, 1999). Les données de température et de salinité mesurées par cette station ont été utilisées pour corriger les effets des variations de la vitesse du son dans l'eau de l'altimètre situé sur la vasière d'embouchure. Ces données ont également une fréquence d'acquisition de 10 minutes et leur précision est respectivement de 0.1 °C et 1 PSU.

La bouée de la Carosse, située à l'embouchure de l'estuaire de la Seine, mesure la direction et l'intensité du vent. Pour ces valeurs, une donnée toutes les 10 minutes est acquise, une valeur moyenne toutes les heures est fournie, la précision des mesures de direction et d'intensité étant respectivement de 10° et de 1 m.s⁻¹ (Woerther, 1999). Ces données sont utilisées afin d'étudier les relations entre la dynamique de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine et les périodes de vent.

Dans l'estuaire fluvial de l'estuaire de Seine, le suivi de cette étude a été complété par les mesures des sondes YSI gérées par le SNS et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Les stations utilisées sont localisées au niveau du Barrage de Poses et à Rouen (Ile Lacroix).

CHAPITRE II :

PROCESSUS SEDIMENTAIRES SUR UNE VASIERE INTERTIDALE DE L'ESTUAIRE FLUVIAL DE SEINE



- 1. Introduction
- 2. Objectifs et stratégie
- 3. Résultats et bilan
- 4. Publication

1. INTRODUCTION

L'originalité de cette étude est de comprendre le fonctionnement d'une vasière intertidale dans la partie fluviale d'un estuaire macrotidal (estuaire de Seine). Peu de travaux s'intéressent au fonctionnement des vasières intertidales dans cette zone estuarienne (Lawler, 2005). Ceci résulte du faible nombre d'estuaires macrotidaux, du faible nombre de vasières intertidales en domaine fluvial et de la localisation préférentielle des sources sédimentaires à proximité de l'embouchure des estuaires macrotidaux.

Les résultats présentés dans ce chapitre concernent la vasière de Oissel (Fig. I-36). Cette partie de l'estuaire est une zone d'eau douce soumise à la marée dynamique, avec une amplitude de 2 m à 126 km de l'embouchure. La zone en amont de Rouen est la moins anthropisée de l'estuaire, les travaux d'aménagements étant principalement concentrés sur l'approfondissement et l'endiguement du chenal de navigation en aval de Rouen (Fig. I-36). Cette partie de l'estuaire, où l'hydrodynamisme est plus faible, présente de nombreuses zones de décantation pour les particules fines de part et d'autre du chenal de navigation. Ces zones ont de faibles étendues (Lesourd, 2000). C'est notamment le cas dans la zone dite « des îles », située entre Poses et Rouen où les particules fines s'accumulent au sein de nombreuses zones intertidales ou subtidales, en marge du chenal ou dans des bras morts, avec des épaisseurs et des surfaces extrêmement variables. (Fig. II-1).



Figure II-1 : Exemple d'accumulation de vases au sein de la zone fluviale de l'estuaire de Seine.
(A) : Au niveau d'un bras mort,
(B) : Au niveau d'une île.

Le forçage majeur dans la partie fluviale de l'estuaire est le cycle hydrologique. La figure II-2 présente les variations des débits fluviaux au cours des 10 dernières années. Outre la présente étude, une étude du fonctionnement des vasières intertidales a été effectuée par Guézennec (1999), sous des régimes hydrologiques significativement différents (Fig. II-2). Sur l'estuaire de Seine, la valeur seuil du débit fluvial qui sépare période de crue et période d'étiage est située à 800m³.s⁻¹. La crue est composée par un pic de crue automnale, suivi par une diminution des débits (en dessous de 800m³.s⁻¹), avant que la crue hivernale se mette en place (Meybeck et al., 1998).



Figure II-2 : Variations des débits liquides de la Seine au cours de la période 1996-2006 (données SNS). Guézennec, 1999 : Suivi piquets en période d'accroissement du débit fluvial. Deloffre, 2005 : Suivi altimétrique en période de décroissance du débit fluvial.

2. OBJECTIFS ET STRATEGIE

L'étude de la partie fluviale de l'estuaire de Seine a pour objectif de :

• de comprendre le rôle de cette vasière et quantifier les taux de sédimentation/érosion, en lien avec les processus hydrologiques et hydrodynamiques (marée, débit fluvial et batillage). Afin d'atteindre cet objectif, un altimètre a été déployé durant environ deux années sur cette vasière en zone de moyenne slikke, correspondant à une zone représentative du comportement moyen de la vasière, tel qu'il a été observé antérieurement (Guézennec, 1999). Ce type de suivi permet de comprendre les processus liés au débit fluvial (long terme), mais également ceux liés à l'influence de la marée (haute fréquence).

• d'étudier les modes d'enregistrement des dépôts au sein de l'estuaire fluvial par une comparaison des enregistrements altimétriques et des images SCOPIX obtenues sur les carottes sédimentaires prélevées au cours de l'étude.

• de proposer un schéma de transfert des particules fines et une quantification des masses stockées et relarguées dans les zones intertidales de l'estuaire fluvial. Les flux de matières en suspension, mesurés par le SNS, à l'entrée du système (Poses) et à Rouen permettent de connaître l'importance du relargage et du stockage des particules fines dans cette zone. Ils sont comparés aux bilans de dépôt/érosion réalisés sur la vasière de Oissel, étendus à l'ensemble des zones d'accumulation du sédiment fin au sein de la zone Poses-Rouen.

Les zones d'envasement sont peu connues dans l'estuaire fluviale de la Seine. Dans cette zone, une campagne d'échantillonnage a donc été menée dans la zone comprise entre le barrage de Poses et Rouen. Cette partie de l'estuaire correspondant à la zone préférentielle d'accumulation d'une partie des particules

fines apportées en crue (Guézennec, 1999). La campagne de prélèvements a été effectuée en septembre 2004, période de fin d'étiage. Les prélèvements montrent que les propriétés du sédiment sont variables, notamment d'un point de vue granulométrique et de teneur en eau. La majorité des courbes granulométriques des prélèvements représentent un mélange vaso-sableux à sablo-vaseux, dont les teneurs en eau varient de 65 à 120%. La fraction granulométrique se compose le plus souvent d'un mélange sable-vase, les sables moyens et grossiers présentant des pics à 200 et 800 µm, alors que les silts et sables fins présentent des pics à 10 et 80 µm (Fig. II-3).



Figure II-3 : Spectres granulométriques typiques des échantillons de sédiments prélevés dans l'estuaire fluvial.

Dans les zones d'accumulation de sédiments fins et de sables de l'estuaire fluvial, la vasière de Oissel a été plus spécifiquement étudiée. Ce choix est basé sur l'expérience acquise au cours des travaux antérieurs (Guézennec, 1999 ; Lesourd, 2000). Bien que cette vasière représente la surface intertidale la plus importante de l'estuaire fluvial (9 500 m²), elle ne représente que 4% des surfaces découvrantes de cette zone. Guézennec (1999) a identifié par des mesures utilisant la technique basse fréquence et basse résolution des piquets, un stockage des particules fines en période de crue, alors que la période d'étiage correspond à une période de relargage du matériel stocké durant la crue. De plus, en raison de son immersion permanente en période de crue, ce type de mesure est impossible à cette période.

Guézennec (1999) relie cette dynamique à la contribution hydrodynamique relative des courants de marée et du débit de la Seine. Toutefois, la méthode d'étude choisie n'avait pas permis de mettre en évidence le rôle des cycles de marée (Guézennec, 1999). De plus, la vasière étant continuellement immergée en période de crue, aucune donnée n'était disponible jusqu'alors pour cette période.

3. RESULTATS ET BILAN (VOIR DISCUSSION § 11.4.)

D'un point de vue méthodologique, les résultats obtenus sur la vasière de Oissel montrent l'intérêt des techniques d'altimétrie dans le cadre d'études décrivant le fonctionnement sédimentaire des vasières intertidales (Fig. II-4). Grâce à l'autonomie de l'instrumentation, un suivi continu de 22 mois a pu être effectué ; la reproductibilité annuelle des mécanismes de dépôt/érosion sur la vasière de Oissel a été démontrée. Au cours de ces deux années, les enregistrements ont montré le rôle des périodes de crue et d'étiage dans les mécanismes sédimentaires dans la partie amont de l'estuaire. Cette étude, effectuée au cours d'années hydrologiques caractérisées par des périodes de crue importantes de la Seine, complète les données acquises précédemment au cours d'années aux plus faibles débits (Guézennec, 1999).

La cadence d'échantillonnage de 1 mesure toutes les 10 minutes, permet de suivre les processus sédimentaires à l'échelle du cycle semi-diurne. Les résultats acquis au niveau de la vasière de Oissel démontrent que les processus sédimentaires à cette échelle sont significatifs et participent lisiblement au fonctionnement sédimentaire des vasières intertidales à l'échelle annuelle. En effet, au cours de chacun de ces cycles semi-diurnes de marée quelques millimètres de sédiment sont systématiquement remaniés.

Les résultats obtenus au cours de la période de 22 mois ont mis en évidence une cyclicité annuelle marquée, cohérente avec les résultats obtenus par Guézennec (1999). Ce suivi sur la vasière de Oissel a précisé, par des mesures à long terme et haute fréquence, le rôle des débits de la Seine dans le contrôle des processus sédimentaires de cette vasière. Les périodes de crue, incluant le pic de crue automnale et la période de crue hivernale, correspondent à une période d'engraissement de la vasière alors que les périodes d'étiage correspondent à une période d'avasière. Les mécanismes de dépôt et d'érosion sur la vasière de Oissel sont associés aux apports solides issus du bassin versant de l'estuaire de Seine, la valeur seuil minimale du débit liquide à partir de laquelle s'établit les périodes d'engraissement et de stockage étant de 800 m³.s⁻¹.

Les mécanismes sédimentaires impliquent des variations topographiques de la vasière de l'ordre de la dizaine de centimètres au cours des épisodes de crue ; toutefois la vasière est quasiment stable à l'échelle de l'année hydrologique. Ce relargage est lié à différents processus, respectivement le forçage par la marée qui entraîne une érosion progressive de la vasière (Fig. II-4A) et des érosions brusques liées à une augmentation de l'hydrodynamisme sur la vasière, par exemple lors des passage de bateaux (Fig. II-4B).



Figure II-4 : Les modalités d'érosion sur la vasière intertidale de Oissel
(A) Erosion progressive au cours des périodes de vives-eaux d'étiage,
(B) Erosion événementielle liée au passage d'un bateau.

Bien qu'aucune étude systématique sur le rôle du batillage n'ait été menée, les données acquises sur la vasière de Oissel, semblent indiquer que le rôle du batillage reste ici limité comparativement à l'érosion liée à la marée. Toutefois, ponctuellement le sédiment remis en suspension par l'agitation, conjuguée à la marée, entraîne un transport des sédiments (Schoellhammer, 1996; Verney et al., 2005b). Outre les caractéristiques du bateau (e.g. : vitesse, forme, tonnage), l'amplitude de l'érosion est dépendante de la consolidation du sédiment et de la hauteur d'eau sur la vasière au moment de l'augmentation de la turbulence. Il apparaît que l'occurrence et l'amplitude de l'érosion sont plus importantes lorsque la hauteur d'eau et le degré de consolidation du sédiment sont plus faibles.

Les données de turbidité confirment les résultats acquis dans cette étude : au cours de la période de crue, les turbidités enregistrées à Poses sont supérieures à celles obtenues à Rouen, alors que ce mécanisme s'inverse en période d'étiage. Les quantifications des masses de sédiment fins stockées en période de crue sont évaluées à 90 000-130 000 tonnes (crue 2001-2002) et 70 000-90 000 tonnes (crue 2002-2003). En fonction de l'importance de la crue et de l'importance des apports liés au bassin versant, le stockage au sein des zones amont de l'estuaire de Seine est variable ; cette relation confirme les données antérieures de Guézennec (1999) acquises au cours de périodes de pluviosité et donc de débits moins importants (crues 1996-1997 et 1997-1998, Fig. II-5).



Figure II-5 : Evolution du stockage des particules fines dans l'estuaire fluvial (Poses-Rouen) en fonction du débit solide de la Seine en période de crue.

L'ensemble des données acquises sur la vasière intertidale de Oissel et dans la zone fluviale entre Poses et Rouen permet de proposer un modèle pour quantifier le transfert de particules fines dans l'estuaire fluvial (Fig. II-5). En période de crue, entre 10 et 30% des apports solides du bassin versant sont piégés au sein des zones découvrantes. Inversement, en période d'étiage, le relargage des particules fines dans la colonne d'eau est réalisé suivant un rythme semi-lunaire vers la partie aval du système estuarien, 30 à 50 % des particules fines qui transitent vers l'estuaire aval au niveau de Rouen proviennent alors des zones d'accumulation localisées en amont du système estuarien.

Cette étude a montré que la vasière intertidale de Oissel présente une évolution annuelle liée aux décharges solides de la Seine. Le rôle de la marée dynamique est exprimé principalement lorsque la vasière est soumise au découvrement (en période d'étiage). Cette cyclicité annuelle contrôle, en grande partie l'érosion de la vasière au cours de cette période. Au cours du cycle semi-diurne, l'étude à haute résolution met en évidence une évolution topographique de la vasière de l'ordre millimétrique.

Finalement, le modèle conceptuel de transfert amont-aval montre que le rôle des vasières intertidales fluviales dans les transferts particulaires à l'échelle de l'estuaire de Seine est à considérer pour les bilans sédimentaires de particules fines, alors que ce type de milieu de vasière découvrante est généralement peu étudié.

4. PUBLICATION

Deloffre J., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S., Verney, R., and Guezennec, L. (2005). Sedimentary processes on an intertidal mudflat in the upper macrotidal Seine estuary, France. *Estuarine and Coastal Shelf Science*, 64 (4), p. 710-720.



Available online at www.sciencedirect.com

Estuarine, Coastal and Shelf Science 64 (2005) 710-720



Sedimentary processes on an intertidal mudflat in the upper macrotidal Seine estuary, France

J. Deloffre^{a,*}, R. Lafite^a, P. Lesueur^b, S. Lesourd^c, R. Verney^a, L. Guézennec^d

^a UMR CNRS 6143, Morphodynamique continentale et côtière, Université de Rouen, 76821 Mont-Saint-Aignan Cedex, France

^b UMR CNRS 6143, Morphodynamique continentale et côtière, Université de Caen, 14000 Caen Cedex, France

^e UMR CNRS 8013 ELICO, Laboratoire de Biogéochimie et Environnement du Littoral,

Université du Littoral-Côte d'Opale, 62930 Wimereux, France ^d Agence de l'Eau Seine-Normandie, 76100 Rouen, France

Received 16 September 2004; accepted 13 April 2005 Available online 23 June 2005

Abstract

In order to understand the hydrodynamic parameters that control the fluvial sediment dynamics on an intertidal mudflat located in a sheltered zone in the upper part (fluvial part) of the macrotidal Seine estuary (France), a two-year field study of high-frequency field measurements was carried out. The bed-level evolution of the mudflat surface was measured from the semi-diurnal period to annual time scales using a high-resolution altimeter. The data showed that the sedimentary patterns on the mudflat were mainly controlled by river flows and tides. During high river flows in winter, sedimentation dominated; suspended particulate matter concentrations were higher, submersion was constant and at semi-diurnal scale, sedimentation duration was more important than erosion due to an asymmetrical tide. By contrast during low river flows in summer, erosion dominated mainly as a result of immersion/emersion of tidal flats during semi-diurnal cycle. From this annual sedimentation—erosion cycle we identify a temporary storage of 10-30% of the fine-grained (<63 µm) river-borne particles on mudflats in the upper section of the fluvial Seine estuary during high river flows.

River-related sediment fluxes were estimated from the measurement of fine-grained sedimentation zones in the fluvial part of the estuary. The erosion/sedimentation processes were perennial, and the amounts of contributing sediments were directly related to the solid river load. Our results indicate that mudflats in the fluvial part of the Seine estuary play an important role in the downstream transfer of fine-grained suspended particulate matter (SPM) towards the turbidity maximum and the Rouen docks particularly during low river flows, when roughly 30–50% of the SPM originates from the eroded intertidal flats. © 2005 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: fluvial estuary; river flows; intertidal mudflat morphology; sediment transport; erosion and deposition; suspended particulate matter (SPM); Seine estuary

1. Introduction

Tidal flats composed of organic and mineralogical material have been the focus of a number of sedimentologic and hydrodynamics studies (e.g. Amos, 1995; Dyer et al., 2000b; Uncles, 2002). Among these investigations, most of the sedimentary studies focused on mudflats located in coastal embayments (i.e. sea water), and in estuarine mouths (i.e. brackish environment) (e.g. Pejrup, 1988; de Wit and Kranenberg, 1997; Black, 1998; Christie et al., 1999; Bassoullet et al., 2000; Dyer et al., 2000a; Uncles, 2002; Lee et al., 2004). For instance, the classification of intertidal mudflats after

^{*} Corresponding author. E-mail address: julien.deloffre@univ-rouen.fr (J. Deloffre).

^{0272-7714/\$ -} see front matter © 2005 Elsevier Ltd. All rights reserved. doi:10.1016/j.ecss.2005.04.004

Dyer et al. (2000b) is restricted to marine intertidal mudflats. No work analyses the sediment dynamics on tidally influenced fluvial mudflats located in upper parts of macrotidal estuaries. This lack of research is attributable to the relatively few number of macrotidal estuaries (Perillo, 1995), and to the low extend of fluvial parts in macrotidal estuarine systems (Wells, 1995). Although, more narrow and more restricted than in middle estuaries, these fluvial estuary tidal flats can be important in the transfer of sediment within the estuary as a whole. The aim of this paper is to bring new information on this type of tidal flats that are not described in literature. Mechanisms of erosion/sedimentation processes on a mudflat in the fluvial part of the estuaries are providing new insights to the transfer and the mass balance of fine-grained sediments on their downstream passage towards macrotidal estuaries.

An extended fluvial zone, in the upper part of estuary, characterizes the Seine estuary. Intertidal flats in this estuary mainly consist of clay and silt deposits (<63 μ m) originating from two different sources (Lesueur et al., 2003): terrigenous material (i.e. from the catchment area of the Paris Basin) and marine particles mainly in middle and marine part of the estuary. Organic matter and most of the contaminants are associated with fine-grained particles (originating from the watershed), which can then be trapped on mudflats (Billon et al., 2002). In order to understand their distribution, we need to improve our knowledge on the dynamics of this material during its downstream transport into the turbidity maximum zone located in the middle Seine estuary.

Over a period of two years, a high-frequency altimeter was deployed to measure the variations in mudflat bed-elevation. The altimeter data were completed by the investigation of surface sediments obtained from cores and current velocity measurements. The sedimentary records were used to determine the forcing processes and parameters controlling the evolution of the tidal flat on varying time scales (Allen and Duffy, 1998; O'Brien et al., 2000).

2. Study area

The macrotidal lower Seine is one of the largest estuaries on the northwestern European continental shelf with a catchment area covering 79,000 km². The hydrodynamics are highly variable and controlled by both tides and river flow. The tides influence the estuary up to 160 km from the mouth with a range of 30 cm at Poses lock (Fig. 1), which represents the tidal limit of the estuary. Here, the Seine River has an annual mean flow of 410 m³ s⁻¹ (Lesourd et al., 2001). The Seine estuary is divided into three domains (Fairbridge, 1980): the lower

(or marine) estuary, the middle estuary and the upper (or fluvial) estuary (Fig. 1). The marine estuary is controlled by tides and waves. The maximum tidal range is about 8.50 m during spring tides at Le Havre (Fig. 1) located at the mouth. The middle estuary is the locus of the turbidity maximum and the brackish mixing zone (Avoine, 1982). This part of the estuary is influenced by waves, tides and river flow. The upper (or fluvial) estuary corresponds to the fresh water zone and is defined by river flows and the reduced impact of tide dynamics (Fairbridge, 1980).

During the last two centuries, the Seine estuary has been strongly altered by man (Lafite and Romaña, 2001). Intensive engineering works were undertaken between Rouen and Le Havre in order to improve navigation. As a result, the lower Seine River was changed from a natural system to one that was controlled (Lesourd et al., 2001). This was undertaken by removal of islands, polder management, and the dyking of the river bed to a single, but deep channel up to Rouen (Fig. 1), reducing the water volume within the Seine estuary and thus, increasing the current velocities to $1-2 \text{ m s}^{-1}$ (Avoine, 1982). As a consequence, in this highly controlled system, the deposition of fine-grained sediments in the fluvial estuary is restricted to areas sheltered from erosion by river and tidal currents. They are located on the inner banks of wide meanders (i.e. point bars) and in the docks of the port of Rouen (Fig. 1).

In the studied zone, the fluvial estuary was not dyked upstream from Rouen. Water depths were low; and thus the modern commercial sailing was limited to barges, and many islands were preserved (islands area, Fig. 1). During low water discharges, abandoned channels were characterized by preferential deposition and storage of fine particles (Fig. 1). The Oissel mudflat formed as a consequence of groynes constructed on the left bank of the Seine in 1981-1982 (Fig. 2). Covering ~9500 m², it represents one of the largest mudflats of the fluvial estuary, though corresponding only to about 3% of the total area exposed in this section. The Oissel area, located 150 km upstream of the river mouth, is still subject to a tidal range of 1.50 to 2.80 m. Moreover, compared to the marine part of the Seine estuary (Le Provost et al., 1986) and to other macrotidal estuaries (e.g. Dyer, 1995; Kang and Jun, 2003), the tidal wave at Oissel shows a pronounced asymmetry with a shorter flood period and an extended ebb tide period (Guézennec et al., 1999).

3. Material and methods

3.1. Water and particulate matter discharges

The Service de la Navigation de la Seine (S.N.S.) provided daily records of the river flows recorded at





Fig. 1. Location of the study area in the Seine estuary.

Poses lock. In addition, concentrations of suspended particulate matter (SPM) were measured by an YSI 6000 instrument, which incorporates an optical turbidity sensors, deployed at Poses and at Rouen. At both sites, the data are given as daily means averaged data based on 5400 turbidity measurements per day. Calibration of the devices was made twice a month using gravimetric analyses of water samples.

3.2. Current velocity measurements

Measurements of current velocities were carried out at Oissel during low river flow conditions (excepting low tide periods due to emergence of the mudflat). Three



Fig. 2. Location (a) and cross-section (b) of the Oissel mudflat. Significant water levels are indicated: (1) highest water level (high river flow and high tide); (2) water level at 800 m³ s⁻¹ (at low tide); (3) lowest water level (low tide and low river flow); SLR = sea-level reference.

different days (13/05/2003, 15/05/2003 and 10/08/2003) with different tidal ranges (6.00, 6.65 and 7.50 m at Le Havre, respectively), were monitored using a 6-MHz Nortek Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). The unit emits an acoustic pulse, which is reflected by the suspended particles a Doppler shifted such that from the echoes pulse their speed can be calculated (Gratiot et al., 2000; Kim et al., 2000). The measuring cell is located at 15 cm from the transmitter, and was set to measure at 5 cm above of sediment–water interface. Velocities were averaged over a 1-min period.

3.3. Bed-elevation monitoring

The bed-level changes of the Oissel mudflat were monitored by an altimeter deployed in the middle part of a cross-section (Fig. 2). The Micrel ALTUS altimeter is a 2-MHz echo sounder. It is composed of an acoustic sensor measuring the travel time between the mudflat surface and the instrument, which was fixed at 25 cm above the sediment surface. Additionally, the altimeter was coupled to a pressure sensor to monitor the water heights above the mudflat (Bassoullet et al., 2000). The resolution of the transducer was 2 cm and its accuracy is 0.06 cm. Bed-elevation and water levels, in order to access semi-diurnal tidal cycle variations, were measured each 10 min. The altimeter was deployed from 05/07/ 2001 to 03/05/2003. These two years of permanent monitoring included two periods of high river flows. In order to extrapolate the measurements from the crosssection to the entire mudflat (45 m width) a series of poles in pairs were fixed within the sediment at four stations along the selected cross-section (Fig. 2). This method was already used during morphological studies of some intertidal areas (e.g. Bassoullet et al., 2000; Andersen and Pejrup, 2001); and involves measuring the distance between the top of the poles and the mudflat surface. Three individual values were averaged at each

pole site and this survey was carried out every two months.

3.4. Tidal flat sediment characteristics

In order to identify seasonal variations in the characteristics of the Oissel mudflat sediments, four sampling periods (VO1-VO4) were undertaken between summer 2001 and spring 2002 (see Fig. 3). During these field works, short cores (length: 30 cm, diameter: 10 cm) were recovered from the uppermost sediment layers (Table 1). Lithology was investigated using the SCOPIX X-ray imagery method developed by the Bordeaux I University (Migeon et al., 1999). This high-resolution instrument permitted the observation of very thin layers of sediment (Lofi and Weber, 2001) that could be subsampled for analysis of the sedimentary characteristics. The grain-size distribution (sand-to-clay fraction) of the individual layers was analyzed using a Laser Beckman-Coulter LS 230. The organic matter content of the sediment was quantified by the technique of ignition loss at 525 °C. The carbonate content was measured using a "Bernard" calcimeter.

4. Results and interpretation

4.1. Annual hydrological changes

During low river flows, the Oissel mudflat is exposed at low tide. By contrast, higher river flows causes continuous submergence of the mudflat for several weeks or even months. The threshold discharge value for submersion has been estimated to be $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Figs. 2 and 3). This value, which separates "low" and "high" river flows, also corresponds to different SPM concentrations at Poses and at Rouen (Fig. 3).

The hydrological data obtained at Poses lock over the study period correspond to high river flows compared to the mean records during the last 50 years (450 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). In this study, the daily water discharge, averaged over one year, amounts to 630 m³ s⁻¹. As previously shown by Guézennec (pers. comm.), the high river flow period in the Seine comprise an 'Autumnal Rising Peak Flow' (ARPF) followed by the 'Winter High River Flow' (WHRF) which is evident on both years that were monitored (Fig. 3). During both studied winters, the WHRF was very high and the strongest flows reached 1800 m³ s⁻¹ at Poses lock. Estimations based on daily averaged turbidity measurement and on daily average water flow can be achieved, estimated from current velocities and height of the river recorded at Poses. These calibrations have been done for both low and high river flows at the same section. During the high river flows in 2001-2002 and 2002-2003 a fine particle supply of 890,000 and 625,000 t, respectively, from the Seine catchment area towards the estuary has been calculated. These supplies correspond to about 80% of the annual solid discharge. During these two periods, a first extreme discharge of SPM occurred during the ARPF (respectively 12-22%), while two more pronounced peaks appear during WHRF (respectively 88-78%).

During the low water periods in summer (Fig. 3), the Seine river flows were higher in 2001 (450 m³ s⁻¹) than in 2002 (210 m³ s⁻¹). However, the averaged values of SPM concentration were of the same order of magnitude during both seasons regardless the river flow: ~10 mg l⁻¹ (Fig. 3). Based on S.N.S daily data, SPM concentrations at the lower boundary of the river (Poses lock) and at Rouen increased during high river flow periods (Fig. 3) and suggesting mean values of 60.5 mg l^{-1} at Poses and 56.1 mg l⁻¹ at Rouen. During the high river flow periods measured over the study period, the SPM are thus higher at the river boundary (i.e. at Poses lock) than in the fluvial estuary (i.e. at



Fig. 3. Variations of SPM concentrations in the Seine River (Rouen) and in the fluvial estuary (Poses Lock) (1/07/2001-1/05/2003). Data provided by the S.N.S. ARPF: autumn rising peak flow; WHRF: winter high river flow.

714

J. Deloffre et al. | Estuarine, Coastal and Shelf Science 64 (2005) 710-720

Table 1 Samples characteristics					
Core reference	Date	Sampling	Sampling technique	River flow at Poses lock ^a (m ³ s ⁻¹)	Solid discharge at Poses lock ^a (t d ⁻¹)
VO 1	05/07/01	Low river flow (emerged site)	Handling coring	358	455
VO 2	24/10/01	Low river flow (emerged site)	Handling coring	633	898
VO 3	22/01/02	High river flow (submerged site)	Reineck corer	836	1447
VO 4	05/03/02	High river flow (submerged site)	Reineck corer	1764	11,924

^a Data from the S.N.S.

Rouen). By contrast, during low water periods the average of SPM is 50% lower at Poses (9.3 mg l^{-1}) than at Rouen (18.3 mg l^{-1}). The observations reported here for the 2001–2003 period confirm previous findings by Guézennec (pers. comm.) during a long-term survey undertaken between 1996 and 998. Paradoxically, during low water level periods, SPM concentrations are higher in the fluvial estuary than at the downstream limit of the Seine River.

4.2. Annual evolution of mudflat morphology

The seasonal changes in bed-elevation of the Oissel mudflat are strongly controlled by the hydrological cycle of the Seine (Fig. 4). A spectral analysis of the water levels during high river flows, when the mudflat is constantly flooded, showed the near disappearance of water level variations in relation with low frequency tidal cycles (i.e. neap-spring cycle); only a part of the semi-diurnal cycle was slightly preserved. By contrast, during low water level periods, when the mudflat emerged at low tide, the spectral analysis clearly revealed the semi-diurnal and fortnightly cycles.

The high-frequency monitoring of the Oissel mudflat reveals strong seasonal bed-level changes (Fig. 4). During high river flows, when the river discharges are higher than $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, sedimentation prevails on the mudflat. A cumulating sedimentation of 19.5 cm (i.e. 8.5 cm occurring during ARPF and 11 cm during WHRF) occurred during 2001–2002 and of 14.5 cm in 2002–2003 (i.e. 5 cm occurring during ARPF and 9.5 cm during WHRF). By contrast, during low water flow periods reduced bed-level elevations are evident due to the erosion of sediments formerly deposited during high river flow periods. The elevation of the mudflat seems quite stable over complete annual cycle. Based on this two-year survey, several phases of bed development can be distinguished (Fig. 4):

- During autumn, a slight erosion of the mudflat was caused by an increase of river discharge combined with low SPM concentrations (2-3 cm).
- (2) At the time of the ARPF, the mudflat was subjected to sedimentation. A direct correlation was found between the river solid discharges and the thickness of the deposits: 8.5 cm elevation subsequent to



Fig. 4. Bed-elevation and water levels measured on the Oissel mudflat during this study (03/07/2001-03/05/2003). The two selected semi-diurnal cycles presented in Fig. 5 are indicated. ARPF: autumn rising peak flow; WHRF: winter high river flow.

a 23,000 td⁻¹ solid discharge during the 2001–2002 ARPF, and only 5 cm bed-elevation from a 15,000 td⁻¹ solid discharge during the 2002–2003 ARPF (Fig. 3). The sedimentation rates are then up to 0.75 cm d⁻¹ in both cases.

- (3) When the ARPF was lower, either continuous (2002-2003) or discontinuous erosion (2001-2002) occurred. These periods of net erosion (1-4 cm between two semi-diurnal cycles) occurred when the water level on the mudflat lowers and current velocities increase at the beginning of the flood period or at the end of ebb tide. Some man-made causes can, however, enhance this phenomenon: (a) an increase of the river flows due to the opening of the gates at the Poses lock; and/or (b) ship generated waves (Schoellhamer, 1996).
- (4) When the WHRF starts to settle, sedimentation occurred on the mudflat, the Seine river flow standing higher than $800 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. The thickness of deposition of the deposits in this period was up to 11 cm during the 2001–2002 WHRF and 9.5 cm during the WHRF 2002–2003, respectively. The sedimentation process was continuous, even if the SPM contributions occurred as several pulses during the higher river flows. The mean sedimentation rates during both WHRF were in the same order of magnitude (0.1 cm d⁻¹); a lower value was observed during the ARPF.
- (5) As the water discharge further decreases, sedimentation continues. This occurred (e.g. in April 2002), when a deposition rate of up to 3.2 cm was recorded on the mudflat. This phenomenon may be due to exceptional supply of solid suspended particles in February 2002. During that period the sedimentation rate was up to 0.1 cm d⁻¹, and thus, was comparable to the rate recorded during the previous WHRF.
- (6) During the end of spring and in summer, when the river flows decreased, the mudflat was again subjected to strong erosion. The thickness of reworked sediment, about 12 cm, was similar on interannual scales and corresponded to a mean erosion rate of 0.075 cm d^{-1} .

Spectral analysis of the bed-elevation data made for low water periods are in good agreement with the semidiurnal and fortnightly tidal cycles, while these cycles are intensely attenuated during high river flow periods. With the return to alternating immersion/emersion conditions over each semi-diurnal cycle at low water level periods, we observed recurrent sedimentary processes linked to tidal processes. The latter are then predominant: the balance between the supply of sediment and the hydrodynamic forcing becomes in favour of tidal currents, which are responsible of the erosion of the mudflat. Bed-elevations measured by the four poles along the cross-section also indicated a seasonal trend of sedimentation during the winter period and erosion during the summer. Differences were, however, found in the annual bed-level variations across the studied section: 14 cm near the channel of the Seine (station 4) and 10 cm towards the dyke (station 1).

4.3. Evolution of the mudflat surface at the semi-diurnal scale

Regardless of the river flow conditions, the Oissel mudflat is eroded during flood tides, and is subject to sedimentation during ebb tides (Fig. 5). The current velocities measured on the mudflat during flood tides (spring and neap) and low river flows (Fig. 6) were in excess of 10 cm s^{-1} (5 cm above the bed) and constant erosion occurred during this period. These values seem low for the threshold of erosion but are related to the characteristics of the sediment (soft mud). Ebb tide conditions first show an acceleration of the currents (to exceed 20 cm s^{-1}), and then a decrease to less than 5 cm s⁻¹ (Fig. 6), leading to settling and final sedimentation of SPM. It can be shown that these observations remain valid for both neap and spring tides. Tidal curves are similar between main channel and mudflat (Unpublished data of the Port authority of Rouen), though current velocities are one order of magnitude higher in the channel $(1-2 \text{ m s}^{-1})$ compared to the mudflat.



Fig. 5. Tidally induced water height variations and related bed-level measurement on Oissel mudflat during several semi-diurnal cycles (see Fig. 5): (a) during summer low river flow $(324 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1})$; (b) at the beginning of the autumnal rising peak flow (ARPF; 1300 m³ s⁻¹). SLR = sea-level reference.

715



716

Fig. 6. Burst current velocities recorded on the Oissel mudflat (5 cm above the bed) revealing the coincidence of highest ebb tide currents and strongest erosion rates (negative currents represent flood and positive currents represent ebb tide).

During low river flows, the tides strongly control the water height and emergence duration on the Oissel mudflat (Fig. 4). The flood and ebb duration being similar: the tidal wave is nearly symmetrical during the submersion of the mudflat (Fig. 5a). However, the record of the pressure sensor shows a difference in duration of the flood-ebb periods in relation to neap/ spring tide conditions. During neap tides, the flood and ebb periods last for 130 min and 160 min, respectively, with an emergence duration of 450 min at low tide. During spring tides, the flood and ebb durations are up to 220 and 260 min, respectively, while the emergence duration is only 260 min. Although the bottom current velocities remain low ($<20 \text{ cm s}^{-1}$) for all tidal ranges (Fig. 6), the eroded depth depends on the tidal range: during higher spring tides, 1 cm of sediment could be reworked, whilst this value decreased to 0.2 cm during neap tides (Fig. 6).

High river flows strongly modify the tidal wave and the Oissel mudflat remains submerged during the tidal cycle. Furthermore, the tidal curve over the mudflat is modified by high river flows: resulting in a tidal curve, which is asymmetrical (Fig. 5b). Under these conditions the ebb duration is much longer (520 min) than the flood period (240 min). Erosion occurs during flood and deposition prevails during ebb. Under high river flow conditions, the duration of the deposition phase is longer than the erosive period causing a trend towards stronger sedimentation during ebb period (Fig. 5b). The absence of emergence during low river flow conditions prevents the mudflat from eroding during the early flood and late ebb, and thus decreases cumulative erosion. The thickness of the eroded depth is lower during high river flow conditions than during low water flows (at about 5 mm, Fig. 5b). A residual sedimentation occurs at the semi-diurnal scale, and the bed-level constantly increases over several semidiurnal cycles during high river flow conditions.

J. Deloffre et al. | Estuarine, Coastal and Shelf Science 64 (2005) 710-720

4.4. Seasonal variations of the sediment properties

Surface sediments of the Oissel mudflat largely consist of clayey and silty material, with a variable sand component. The grain-size distribution of the sampled sediment is characterized by several modes ranging between coarse silt (15-20 µm) and medium-to-coarse sands (200-800 µm) The sand content is higher at station 4 close to the channel, than at station 1 near the dyke (Fig. 2). The coarsest sediments across the section (carbonaceous sands) are found on the bottom of the main channel rather proximal from the mudflat, where the instantaneous currents are the strongest. Therefore the sand content decreases shoreward across the mudflat. The mud of the Oissel tidal flat has a high water content, a parameter known to be influenced by the grain-size and the mud consolidation state. The values are more often >100%, fluctuating between 80% during erosion periods and 250% during deposition periods; the dry bulk density varies widely from 1100 to 1800 kg m⁻³. The carbonate content of the sediment in the Oissel mudflat lies between 20 and 50% (averaged value of 33%). The organic matter content is also high (15-19%) in the surface sediments.

The lithological analysis of the sediments cores (Fig. 7) shows laminated material, which is a common observation in environments subjected to tidal influence, either in modern or ancient sediments (e.g. Tessier et al., 1995). The adjustment using the altimeter data appear to be consistent with the lithofacies variations, as shown by the presence of sandy layers that can be correlated from one core to another (Fig. 7). The core sampled after the high river flow period (VO4) is consistent with the altimeter data. The high river flow deposit can be clearly identified during winter (VO3 and VO4, Fig. 7). The characteristics of high river flows deposits are similar to those observed during low river flow surveys (VO1 and VO2): high porosity; macro voids, similar carbonate, organic matter and grain-size (Fig. 8). However, the water content of recent (VO3 and VO4) deposit is higher (mean value of ~180%) compared to those observed during eroding period (mean value of $\sim 90\%$). The fine sediment being characterized by high water content and numerous macro voids indicating that it could be easily eroded by weak currents such as those measured on the mudflat (Fig. 6).

5. Discussion and synthesis

The results of the study on the Oissel tidal flat over a two-year period confirm that two major factors control the sediment dynamics in the fluvial Seine estuary: (a) river flows; and (b) tides. A conceptual model of particle/sediment transfer is proposed on annual scale (Fig. 8).



J. Deloffre et al. / Estuarine, Coastal and Shelf Science 64 (2005) 710-720.

Fig. 7. Seasonal evolution of the sediment on the Oissel mudflat based on X-ray analysis (positive radiographs), Altus data and grain-size spectra. The core sampled on the 05/07/03 (VO1) was considered as reference (surface level). The changes in bed surface elevation of the three following cores were respectively -6.7, -10.9 and -5.65 cm.

As soon as the high river flows begin, deposition starts on the mudflat as a result of its constant submersion and an increase in the fluvial SPM discharge. Under these conditions a marked asymmetry is introduced in the tidal curve resulting an increase in the duration of the ebb tide. This leads to a switch



Fig. 8. Schematic of the sediment transfer in Seine fluvial estuary. (a) Sedimentation/erosion on Oissel mudflat, (b) SPM discharges in the river (Poses lock) and in the fluvial estuary (Rouen).

towards enhanced deposition of fine sediment. One of the consequences of this sedimentation is a reduction in SPM concentration in the fluvial estuary (Rouen) than in the river (Poses).

When the river flow decreases further, erosion of the mud deposits increases at the surface, which were stored before in the upstream section of the fluvial estuary (Fig. 4). A possible lag of some weeks may be due to the stability of the bed-elevation (e.g. late spring 2002), or through the continual sedimentation of material originating from the erosion of upstream mud or sand areas (e.g. spring 2001). When the sediment supply from the upstream sections of the fluvial estuary decreases, erosion dominates on the Oissel mudflat in response to the semi-diurnal and fortnightly tidal cycles. During low river flow periods, the fortnightly tidal period controls flow patterns: causing erosion of the mudflat and subsequent transfer of SPM towards the middle estuary (Fig. 8). On the basis of repetitive sampling of SPM in several parts of the Seine channel, Guézennec et al. (1999) showed that the transfer of upstream fine-grained material to the downstream section of the estuary occurs fortnightly periodicity correlated with the reduction of the tidal range. The comparison of the SPM at the upper limit of the estuary (Poses lock) and at Rouen reveals that the transfer to the lower estuary during low river flows is rather steered by the fortnightly period; the present work shows that this downstream particle transport is fed by eroded mud deposits from the island areas.

717

The results presented are reproducible over four years: they were observed several times over one year, namely during the autumn rising peak flows (ARPF), when the highest sedimentation rates were recorded, and also during the winter high river flows (WHRF). The two years of survey showed an annually repeating morpho-sedimentary pattern. In a less accurate study of bed-elevation using poles during lower mean annual river flow (410 m³ s⁻¹), Guézennec (pers. comm.) described the similar changes in morphodynamics processes between high and low river flows.

718

The SPM fluxes in the fluvial Seine estuary have also been estimated and taking into account the role of the mudflats in the transfer of SPM along the fluvial estuary during high and low river flow conditions. Two different estimation methods were applied: (a) comparison of the measured daily SPM fluxes (S.N.S data, Fig. 3) at the two monitored sites: the entrance of the fluvial estuary (Poses lock) and at the lower boundary of the islands area (Rouen); and (b) the extrapolation of the bed-level data acquired on the Oissel mudflat using the Altus monitoring. The first method considers a global riverrelated sediment budget in the fluvial estuary, while the second method exclusively focuses on the budget of material from tidal flat areas. For these global estimations, we considered only the fine-grained sediment components (i.e. <63 µm), because the sand fraction is low (<5%) in most of the cores.

During high river flows, comparing the daily data of SPM concentrations at Poses and at Rouen and the water discharge, the fine-grained sediment trapped within the fluvial estuary was estimated between 90,000 t (2002-2003) and 130,000 t (2001-2002). Extrapolating the results of the studied station to the whole Oissel mudflat (9500 m²), the sedimentation rate in high river flow periods and during a semi-diurnal cycle is close to 16 t d⁻¹ (assuming a dry bulk sediment density of 1200 kg m⁻³). Considering a deposit thickness of 19.5 cm for the entire surface area of the Oissel mudflat during the 2001-2002 high river flows, the resulting mass of stored sediment amounts to 2600 t. Transferring this model to all mud areas present in the fluvial estuary leads to a budget of 70,000 t of sediment (i.e. 14.5 cm thick layer) deposited during 2002-2003 high river flows, and to 90,000 t during 2001-2002. Although this budget is a very rough estimate, both methods produce the same order of magnitude of SPM fluxes in the fluvial estuary. However, considering the differences between the two methods and the tributary river contributions, the deposition in the upstream mudflats of the fluvial estuary seems to be under estimated. Finally during high river flows, the intertidal areas in the fluvial estuary stored between 11 and 16% of the fine-grained material supplied from the catchment area of the Seine River to the Seine estuary. A preliminary study of the Oissel mudflat (Guézennec, pers. comm.), which was conducted during both lower mean water discharge ($410 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) and SPM supplies ($1650 \text{ t} \text{ d}^{-1}$) led to similar contributions (13-27%). However, because of the lower fluvial particle supplies (450,000 and 220,000 t in 1996–1997 and 1997–1998, respectively), Guézennec et al. (1999) calculated lower masses of stored material in the fluvial estuary: 61,000 t (1996-1997) and 58,000 t (1997-1998).

During the low river flow period, nearly all the material (i.e. 90% in 2002) deposited during the previous winter period was reworked and eroded. The daily erosion rates on the Oissel mudflat were 13 t d1. The total amount of SPM at the upstream limit of the fluvial estuary was 74,000 t while increasing to 160,000 t at Rouen; this confirms the net downstream transfer of fine particles from the islands area to the downstream estuary during low river flows. Thus, 53% of the total mass of SPM that is transferred downstream at Rouen originates from mudflat erosion in the islands area (86,000 t). Using the altimeter data, the total amount of sediment eroded in the islands area of the estuary was estimated at 56,000 t (i.e. 35% of the SPM transferred towards Rouen). The difference between these two evaluations is 30,000 t; this could be due to the SPM contribution of tributary rivers discharging into the Seine River between Poses and Rouen (these contributions have been previously estimated at 22,000 t, Dupuis, pers. comm.).

The residence time of particles in estuarine systems is often estimated based on data from the turbidity maximum zone (Baskaran et al., 1997; Brooks et al., 1999; Uncles, 2002; Ciffroy et al., 2003; Lesourd et al., 2003). Few studies have been carried out in the fluvial part of estuaries; most of the river-borne particles settle in marine part of estuaries or in the turbidity maximum zone (Baskaran et al., 1997; Golbuu et al., 2003; Shen and Haas, 2004) and thus studies on marine mudflats are well developed (e.g. Dyer et al., 2000b). In the manaltered Seine estuary, sediment trapping in the fluvial part of the estuary occurs on intertidal mudflats and thus increases the particle residence time in the entire estuary system. Finally, the temporarily stored material in the upper estuary mudflats will be transported stepwise to the TMZ, predominantly during neap tides, when the flood flows are weaker (Guézennec et al., 1999). This stepwise downstream supply of fine-grained material (river-borne particles) is estimated to be 10-40% of the total particle mass trapped within the TMZ, which contains between 200,000 and 500,000 t of particulate material (Avoine, 1982; Brenon and Le Hir, 1999; Le Hir et al., 2001).

6. Conclusions

This study brings new information on the poorly studied fluvial zone of macrotidal estuaries. A continuous two-year survey of a selected intertidal mudflat in the fluvial part of the macrotidal Seine estuary, which included acquisition of high-frequency topographical, and water level data was compared with hydrological and SPM concentrations at the upper and lower boundaries of this fluvial estuary. The two-year data set demonstrate that the processes at annual scale are perennial and permit to conclude on the role of intertidal mudflats on fine-grained material budget at the entire estuary scale. This work shows the necessity of high resolution and long-term survey necessary to understand these complex dynamics. The main findings of this survey are listed below:

- (a) The high-frequency measurements with the altimeter permitted recording of the rhythms of sedimentation/erosion on the Oissel mudflat at semi-diurnal, spring/neap tidal scale and annual scale;
- (b) During high river flows, the river discharge is the main controlling parameter; the mudflat remains submerged and sedimentation prevails. During this period of permanent flooding, tides play a subordinate role in hydrodynamic and sedimentary processes on the mudflat;
- (c) During low river flows, tides predominantly control the sedimentary processes prevailing and erosion dominates the intertidal mudflat;
- (d) Regardless the hydrodynamic during semi-diurnal scale, a few millimeters of surface sediments are reworked during each semi-diurnal cycle;
- (e) A quantitative conceptual scheme for particle transfer in the estuary has been achieved. The welldeveloped fluvial part of the Seine estuary (islands area) represents a temporary sedimentation area for 10-30% of the river-borne material during high river flows. This stock of sediment is reworked during low river flow periods, when the erosive flood tide conditions become predominant. The removed material is mixed with the river-borne supply at a level of 30-50% and then transferred towards the middle estuary, mainly driven by the fortnightly cycles. This mechanism is responsible for higher SPM concentrations during low river flow within the Seine fluvial estuary (i.e. Poses-Rouen section) as compared to the river (upstream of Poses lock). A significant part of the Seine SPM is stored in the fluvial estuary for several months before reaching the downstream part of the estuary. Hence, the residence time of this material becomes important and must be considered in the fine particles' budgets along macrotidal estuaries.

Acknowledgements

This study was carried out within the French Interdisciplinary Program Seine-Aval (web site: http:// seine-aval.crihan.fr), supported by the following partners: the French State, the Haute-Normandie Region and the other Regions of the Paris basin, the Agence de l'Eau Seine-Normandie, and the industrial firms of the Haute-Normandie. This work was also supported by the franco-british Rimew Interreg IIIA programme (http:// info1.scitech.sussex.ac.uk/rimew).

The studies were supported by Karen Tiphagne and Michel Simon (field work), Jean-Claude Brun-Cottan (grain-size analyses) and Oliver Weber (X-ray imagery). The authors are grateful to André Ficht and Marielle Olivier (Service de la Navigation de la Seine) for providing SPM concentrations and river flow data. We also thank Jonathan Taylor for his helpful comments.

References

- Allen, J.R.L., Duffy, M.J., 1998. Temporal and spatial depositional patterns in the Severn Estuary, southwestern Britain: intertidal studies at spring-neap and seasonal scales, 1991-1993. Marine Geology 146 (1-4), 147-171.
- Amos, C.L., 1995. Siliciclastic tidal flats. In: Perillo, G.M.E. (Ed.), Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Developments in Sedimentology, vol. 53. Elsevier, Amsterdam, pp. 273-306.
- Andersen, T., Pejrup, M., 2001. Suspended sediment transport on a temperate, microtidal mudflat, the Danish Wadden Sea. Marine Geology 173 (1-4), 69-85.
- Avoine, J., 1982. Mécanismes contrôlant la dynamique des sédiments en suspension dans l'estuaire de la Seine. Mémoires de la Société Géologique de France 144, 17-25.
- Baskaran, M., Ravichandran, M., Bianchi, T.S., 1997. Cycling of ⁷Be and 210Pb in a high DOC, shallow, turbid estuary of south-east Texas. Estuarine, Coastal and Shelf Science 45 (2), 165-176.
- Bassoullet, P., Le Hir, P., Gouleau, D., Robert, S., 2000. Sediment transport over an intertidal mudflat: field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Marennes-Oleron" (France). Continental Shelf Research 20 (12-13), 1635-1653.
- Billon, G., Ouddane, B., Boughriet, A., 2002. Chemical speciation of sulfur compounds in the surface sediments from three bays (Fresnaye, Seine and Authie) in northern France, and identification of some factors controlling their generation. Talanta 53, 971-981.
- Black, K.S., 1998. Suspended sediment dynamics and bed erosion in the high shore mudflat region of the Humber estuary, UK. Marine Pollution Bulletin 37 (3-7), 122-133.
- Brenon, I., Le Hir, P., 1999. Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): identification of formation processes. Estuarine, Coastal and Shelf Science 49 (4), 525-544.
- Brooks, D.A.M., Baca, W., Lo, Y.T., 1999. Tidal circulation and residence time in a macrotidal estuary: Cobscook Bay, Maine. Estuarine. Coastal and Shelf Science 49 (5), 647-665.
- Ciffroy, P., Reyss, J.L., Siclet, F., 2003. Determination of the residence time of suspended particles in the turbidity maximum of the Loire estuary by ⁷Be analysis. Estuarine, Coastal and Shelf Science 57 (4), 553-568.
- Christie, M.C., Dyer, K.R., Turner, P., 1999. Sediment flux and bedlevel measurements from a macrotidal mudflat. Estuarine, Coastal and Shelf Science 49 (5), 667-688.
- Dyer, K.R., 1995. Sediment transport processes in estuaries. In: Perillo, G.M.E. (Ed.), Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Developments in Sedimentology, vol. 53. Elsevier, Amsterdam, pp. 423–449.

720

J. Deloffre et al. | Estuarine, Coastal and Shelf Science 64 (2005) 710-720

- Dyer, K.R., Christie, M.C., Feates, N., Fennessy, M.J., Pejrup, M., Van der Lee, W., 2000a. An investigation into processes influencing the morphodynamics of an intertidal mudflat The Dollard Estuary, The Netherlands: I. Hydrodynamics and suspended sediments. Estuarine, Coastal and Shelf Science 50 (5), 607–625.
- Dyer, K.R., Christie, M.C., Wright, E.W., 2000b. The classification of intertidal mudflats. Continental Shelf Research 20 (10-11), 1039– 1060.
- Fairbridge, R.W., 1980. The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: Olausson, E., Cato, I. (Eds.), Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries. Wiley, New-York, pp. 1–35.
- Guézennec, L., Lafite, R., Dupont, J.-P., Meyer, R., Boust, D., 1999. Hydrodynamics of suspended particulate matter in the tidal freshwater zone of a macrotidal estuary (the Seine estuary, France). Estuaries 22 (3A), 717-727.
- Golbuu, Y., Victor, S., Wolanski, E., Richmond, R.H., 2003. Trapping of fine sediment in a semi-enclosed bay, Palau, Micronesia. Estuarine, Coastal and Shelf Science 57 (5-6), 941-949.
- Gratiot, N., Mory, M., Auchère, D., 2000. An acoustic Doppler velocimeter (ADV) for the characterisation of turbulence in concentrated fluid mud. Continental Shelf Research 20 (12-13), 1551-1567.
- Kang, J.W., Jun, K.S., 2003. Flood and ebb dominance in estuaries in Korea. Estuarine, Coastal and Shelf Science 56 (1), 187–196.
- Kim, S.C., Friedrichs, C.T., Maa, P.Y., Wright, L.D., 2000. Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic Doppler velocimeter data. Journal of Hydraulic Engineering 128 (6), 399-406.
- Lafite, R., Romaña, L.-A., 2001. A man-altered macrotidal estuary: the Seine estuary (France): introduction to the special issue. Estuaries 35 (6B), 939.
- Le Hir, P., Ficht, A., Silva Jacinto, R., Lesueur, P., Dupont, J.-P., Lafite, R., Brenon, I., Thouvenin, B., Cugier, P., 2001. Fine sedimentation transport and accumulations at the mouth of the Seine Estuary (France). Estuaries 35 (6B), 950–963.
- Le Provost, C., Fornerino, M., Villaret, C., 1986. Sur l'hydrodynamisme de la baie de Seine. Résultats d'observations et de modélisations. In: La baie de Seine (Gréco-Manche). Actes Colloque, vol. 4. Ifremer, pp. 43-48.
- Lee, H.J., Hyung, R.J., Chu, Y.S., Bahk, K.S., 2004. Sediment transport on macrotidal flat in Garolim Bay, west coast of Korea: signification of wind waves and asymmetry of tidal current. Continental Shelf Research 24 (7-8), 821-832.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Auffret, J.-P., Poupinet, N., Laignel, B., 2001. Morphosedimentary evolution of

the macrotidal Seine estuary subjected to human impact. Estuaries 24 (6B), 940-949.

- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.C., Garnaud, S., Poupinet, N., 2003. Seasonal variations in the characteristics of superficial sediments in a macrotidal estuary (the Seine inlet, France). Estuarine, Coastal and Shelf Science 58 (1), 3-16.
- Lesueur, P., Lesourd, S., Lefebvre, D., Garnaud, S., Brun-Cottan, J.-C., 2003. Holocene and modern sediments in the Seine estuary (France): a synthesis. Journal of Quaternary Science 18 (3-4), 339-349.
- Lofi, J., Weber, O., 2001. SCOPIX digital processing of X-ray images for the enhancement of sedimentary structures in undisturbed core slabs. Geo-Marine Letters 20, 182-186.
- Migeon, S., Weber, O., Faugeres, J.-C., Saint-Paul, J., 1999. SCOPIX: a new X-ray imaging system for core analysis. Geo-Marine Letters 18, 251-255.
- O'Brien, D.J., Whitehouse, R.J.S., Cramp, A., 2000. The cyclic development of a macrotidal mudflat on varying timescales. Continental Shelf Research 20 (12-13), 1593-1619.
- Pejrup, M., 1988. Suspended sediment transport across a tidal flat. Marine Geology 82, 187-198.
- 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, vol. 53. Elsevier, Amsterdam, pp. 17-47.
- Schoellhamer, D.H., 1996. Anthropogenic sediment resuspension mechanisms sin a shallow microtidal estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science 43 (5), 533-548.
- Shen, J., Haas, L., 2004. Calculating age and residence time in the tidal York River using three-dimensional model experiments. Estuarine, Coastal and Shelf Science 61 (3), 449-461.
- Tessier, B., Archer, A.W., Lanier, W.P., Feldman, H.R., 1995. Comparison of ancient tidal rhythmites (Carboniferous of Kansas and Indiana, USA) with modern analogues (the bay of Mont-Saint-Michel, France). Special Publications of the International Association of Sedimentologists 24, 259-271.
- Uncles, R.J., 2002. Estuarine physical processes research: some recent studies and progress. Estuarine, Coastal and Shelf Science 55 (6), 829-856.
- Wells, J.T., 1995. Tide-dominated estuaries and tidal rivers. In: Perillo, G.M.E. (Ed.), Developments in Sedimentology. Geomorphology and Sedimentology of Estuaries, vol. 53. Elsevier, Amsterdam, pp. 179-205.
- de Wit, P.J., Kranenberg, C., 1997. The wave-induced liquefaction of cohesive sediment beds. Estuarine, Coastal and Shelf Science 45 (2), 261-271.

Le chapitre suivant s'attache au fonctionnement hydrosédimentaire de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine. Le contexte hydrodynamique dans cette partie de l'estuaire est très différent, dominé par la houle et la marée. D'un point de vue sédimentaire, cette partie aval de l'estuaire correspond à la zone du bouchon vaseux.

CHAPITRE III :

PROCESSUS SEDIMENTAIRES SUR UNE VASIERE INTERTIDALE A L'EMBOUCHURE DE L'ESTUAIRE DE SEINE



- 1. Introduction
- 2. Objectifs et stratégie
- 3. Résultats et bilan
- 4. Publication

1. INTRODUCTION

Le fonctionnement hydrosédimentaire des vasières intertidales aval des estuaires est connu, contrairement à celui de la partie fluviale. Un certain nombre de travaux font référence à des mesures altimétriques à haute résolution à l'échelle du cycle de marée (Christie et al., 1999 ; O'Brien et al., 2000 ; Bassoullet et al., 2000 ; Andersen et al., 2001). De même, la connaissance de la dynamique du bouchon vaseux de nombreux estuaires macrotidaux est connue (e.g. : Avoine, 1981 ; Castaing, 1981 ; Fettweis et Van der Eynde, 2003) et modélisée (Brenon et Le Hir, 1999a ; 1999b ; Sottolichio, 1999 ; Le Hir et al., 2001 ; Uncles et al., 2002).

A l'embouchure de l'estuaire de la Seine, dans la partie interne, l'hydrodynamisme est dominé par la marée, la houle et le débit fluvial. Dans cette partie de l'estuaire, la source principale de sédiments fins mobiles est le bouchon vaseux. Il est localisé, à basse mer, le plus souvent dans la zone de la vasière intertidale d'embouchure, étudiée dans ce chapitre (Fig. I-33).

2. OBJECTIFS ET STRATEGIE

L'objectif de ce suivi sur la vasière d'embouchure est de :

- Mettre en évidence les cyclicités actuelles de dépôt et d'érosion sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine,
- Préciser finement, grâce à des mesures à haute résolution et long terme, les relations entre la vasière d'embouchure et la dynamique du bouchon vaseux et quantifier les transferts sédimentaires,
- Modéliser le fonctionnement sédimentaire de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine,
- Interpréter les enregistrements lithologiques observés par les carottes grâce à la connaissance des dépôts actuels.

Afin d'atteindre ces objectifs, il a été établi une comparaison des données provenant des mesures de turbidité de la bouée MAREL Honfleur localisée dans le chenal central de Seine et des données altimétriques du site de référence de la vasière Nord (Fig. III-1). La fréquence d'acquisition pour ces deux instruments est d'une mesure toutes les 10 minutes.



Figure III-1 : Photographie à marée basse de la zone d'embouchure de l'estuaire de Seine et localisation des points de mesures (Photo : A. Cuvilliez.)

La vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine (« vasière Nord ») possède une surface de slikke de l'ordre de 3,2 km² (Fig. I-33). La station d'implantation de l'altimètre a été choisie en zone de moyenne slikke, dans la zone interne (zone Est) de la vasière (site de référence, Fig. III-1 et III-2). La zone est traversée par des chenaux transverses, visibles sur la figure III-1. Le site choisi pour représenter la vasière Nord révèle un comportement stable à l'échelle annuelle, mais avec des périodes d'érosion et de dépôt (Bessineton, 1997 ; Lesueur et Lesourd, 1999 ; Lesourd, 2000). Da Silva (2002) montre que la zone externe de la vasière est fortement contrôlée par les périodes d'agitation dues aux vents. Ce phénomène n'est toutefois pas, à l'exception des tempêtes exceptionnelles (Da Silva, 2002), représentatif de l'ensemble de la vasière, l'influence de l'agitation diminuant en progressant vers la partie interne de l'estuaire. Pour quantifier les transferts de particules fines à l'échelle de cette vasière de 3,2 km², la prise en compte d'un seul point de mesure est insuffisante : un second point de mesure en zone externe, des données antérieures, des campagnes de terrain altimétriques ciblées et complémentaires des données du site de référence, et une campagne de photo aérienne basse altitude permettent cette quantification.

Les travaux antérieurs sur la vasière Nord sont principalement ceux de Lesourd (2000), qui a considéré les variations des épaisseurs de dépôts récents le long d'une radiale (Nord-Sud) depuis le schorre jusque la microfalaise (Figure III-2). La station de référence de cette étude correspond à la station 6 de cette radiale Nord-Sud étudiée précédemment par Lesourd (2000).



Figure III-2 : Log interprétés à partir des descriptions et des photographies des carottes courtes prélevées le long d'une radiale N-S sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine (Lesourd, 2000, modifié).

L'épaisseur du dépôt le plus récent (Lesourd, 2000), la vase actuelle molle (Fig. III-2), décroît de la basse slikke vers le schorre. Ce type de profil est classique pour les vasières intertidales, le même type d'observation a été effectué pour la vasière de Oissel. Les amplitudes des variations topographiques sont également plus importantes en basse slikke qu'en haute slikke. Les résultats des variations topographiques enregistrées par la méthode des piquets-repères (Lesourd, 2000) ont abouti à l'identification de tendances similaires. Ces résultats ont permis de prendre en compte les variations transversales des épaisseurs de dépôt entre la basse slikke et le schorre.

Différentes campagnes ont été menées afin d'étudier les variations latérales des épaisseurs de dépôt. Les mesures du site référence comparées à d'autres altimètres positionnés sur la vasière au cours d'une phase de dépôt, ont permis de quantifier le rôle des chenaux transverses qui morcellent la vasière (Lesourd et al., 2001) et d'étudier la représentativité du site de référence situé dans la partie interne de l'estuaire. Les résultats à l'échelle annuelle, acquis sur la vasière d'embouchure permettent alors de prévoir les périodes de sédimentation avec exactitude, les forçages étant bien identifiés.

3. RESULTATS ET BILAN (VOIR DISCUSSION § 111.4.)

3.1. Tassement des vases

Les dépôts sur la vasière Nord de l'estuaire de la Seine s'effectuent rapidement (2 à 8 cm), mais sont épais (2 à 8 jours). Dès ce dépôt, la topographie diminue, à cause de l'érosion et/ou du tassement de cette vase fluide. Afin de déterminer les ordres de grandeur du tassement et les soustraire aux données altimétriques brutes pour évaluer la valeur réelle de l'érosion, la vase fluide a été mise en place dans une colonne de sédimentation avec des épaisseurs similaires à celles des dépôts sur la vasière (2 à 8 cm). Les variations de hauteur ont alors été suivies au cours du temps. Ce suivi a été effectué sur une durée de 15 jours, en se basant sur les données de terrain d'évolution de la teneur en eau : en 15 jours, le sédiment de surface évolue d'une teneur en eau de 200% à 85 %. Ces résultats sont cohérents avec l'ordre de grandeur des échelles de temps du tassement proposées dans la littérature (Kynch, 1952 ; Sanchez et Grovel, 1994 ; Lesourd et al., 2005).



Figure III-3 : Granulométrie de la crème de vase étudiée en laboratoire pour les processus de tassement.

Les mesures de tassement sont effectuées selon deux conditions expérimentales : sédiment immergé ou sédiment émergé, afin de prendre en compte le rôle de l'émersion en milieu intertidal. Les résultats moyennés montrent que les profils de tassement sont de type logarithmique (Migniot, 1989). Le tassement est rapide au cours des deux premières heures, la crème de vase est en grande partie consolidée au bout de deux jours (Migniot, 1989 ; Lesourd et al., 2005). Il en résulte que les variations topographiques liées au tassement de la crème de vase de l'estuaire de Seine sont de l'ordre de 20-30% (Lesourd et al., 2005 ; Deloffre et al., accepté). Cette approche préliminaire des processus de tassement a permis de prendre en compte le processus de tassement lors des enregistrements topographiques sur la vasière Nord et de les corriger (Fig. III-4).



Figure III-4 : Modèle de tassement appliqué aux données ALTUS comparé aux données non corrigées.

Pour chaque épisode de dépôt, l'amplitude des variations liées au tassement a été évaluée en fonction des résultats acquis en laboratoire. Cette étude a permis de soustraire le terme de tassement pour chaque phase de dépôt : la chronique résultante ne prend donc en compte que les valeurs de sédimentation et d'érosion et les processus respectifs.

3.2. Cyclicité lunaire de dépôt

L'étude combinée des données sur le bouchon vaseux localisé principalement dans le chenal central de la Seine (données MAREL) et des mesures altimétriques sur la vasière d'embouchure (données ALTUS) a permis de décrire finement leurs échanges sédimentaires (Deloffre et al., accepté). Au cours des périodes des plus fortes vives-eaux, la remise en suspension du matériel du bouchon vaseux vers la colonne d'eau est maximale (>1,95 g.l⁻¹), tel qu'indiqué par les données MAREL ; la masse d'eau chargée en particules fines atteint la vasière, grâce au niveaux d'eau élevés au cours de la période de vives-eaux. Les courants sont faibles sur la haute et moyenne slikke (< 0,4 m.s⁻¹). Les particules fines peuvent décanter à pleine mer, processus favorisé par la longue étale (2-3 heures) lors de ces conditions de marée, induisant des dépôts rapides sur la vasière, sous la forme de vase fluide. Les taux de sédimentation importants, 0,3 à 0,8 cm par cycle de marée semi-diurne, reflètent l'importance des apports en MES au cours de la période de plus fortes vives-eaux, mettant ainsi en avant l'influence du cycle lunaire. Un cycle lunaire, bien marqué, de sédimentation et d'érosion/tassement apparaît donc.

L'érosion liée à l'alternance recouvrement/découvrement se produit progressivement, au cours des périodes de mortes eaux et de vives eaux faibles et moyennes, avec des taux d'érosion constants au cours de l'année (0,04 à 0,17 cm.jour⁻¹). A cette période, les apports par le bouchon vaseux sur la vasière sont trop

faibles pour permettre un dépôt significatif : l'érosion domine. Ce phénomène est caractérisé par un clapot plus ou moins constamment présent sur le secteur (Verney et al., 2005b). En plus de cette érosion continue liée à l'alternance des cycles de marée, le vent a également un impact sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine (Da Silva, 2002). Au cours des périodes de vent (>12 m.s⁻¹) d'origine ouest/sud-ouest, la turbulence au fond est importante (> 1 N.m⁻²) et des érosions brusques (entre 0,5 et 2 cm) sollicitent la surface de la vasière. Les enregistrements à l'échelle annuelle montrent que ce type d'évènements se produisent une dizaine de fois dans l'année, préférentiellement en période hivernale. L'amplitude de l'érosion est également fonction du degré de cohésion du sédiment, notamment en raison des variations importantes entre la vase fluide fraîchement déposée et la vase consolidée après plusieurs jours.

A l'échelle annuelle, la stabilité ou l'érosion de la vasière sont continues sur 99% du temps. En raison de la présence et du rôle du bouchon vaseux, la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine est soumise à un rythme lunaire de sédimentation (~ $10-18 \text{ cm.an}^{-1}$). Les dépôts sont plus importants et plus fréquents au cours des périodes d'étiage, car le bouchon vaseux est localisé à l'intérieur de l'estuaire, et au cours des périodes d'équinoxe (i.e. période préférentielle de plus fortes vives-eaux) favorisent la succession de phases de dépôts. En période d'étiage, les chenaux transverses qui morcellent la vasière stockent du matériel fin sous forme de vase fluide ou très molle, qui est apportée par la circulation dans les chenaux, à marée montante, et recouvre la vasière au cours des cycles lunaires (Lesourd 2000 ; Deloffre et al., accepté). La campagne de prélèvement de carottes sédimentaires (Fig. III-2) décrite par Lesourd (2000), a été effectuée le 28/11/1997, soit 12 jours après une période de vives eaux. La présence de cette vase fluide en surface est donc cohérente avec les résultats obtenus dans la présente étude. Les érosions liées au vent sont aussi à prendre en compte dans le cycle annuel, les périodes de vent important se produisant en hiver. Finalement à l'échelle annuelle, une variabilité saisonnière existe avec une période préférentielle d'érosion en crue, et une sédimentation préférentielle en période d'étiage et de post-crue. L'identification et la quantification des rythmes et des forçages de la sédimentation permettent de prévoir les périodes de sédimentation sur la vasière d'embouchure de la Seine.

Grâce au couplage altimétrie-suivis piquets et aux images aériennes à basse altitude (Fig. III-5) une quantification des transferts sédimentaires à l'échelle de la vasière a pu être réalisée (Deloffre et al., accepté). Cette technique de télédétection basse altitude permet d'obtenir une résolution au sol de 44 cm. Les zones de dépôt sur la vasière intertidale sont localisées après analyse colorimétrique des images (Cuvilliez, 2003). Un exemple est présenté sur la figure III-5, zone correspondant à un cliché au niveau du site de référence de l'altimètre. Sur cette zone, le taux de recouvrement du dépôt, après masquage (i.e. zone de schorre, zone des chenaux, zone sans dépôt sont traités comme zones de non dépôt), est de 46 % (Cuvilliez, 2003).



La quantité maximale de matériel stocké au cours de l'année est de l'ordre de 25-40% de la masse estimée du bouchon vaseux (200,000 à 500,000 tonnes). Un épisode d'érosion, causé par un vent supérieur à 12m.s⁻¹ orienté Ouest-Sud-Ouest, associé à l'action de courants de marée, peut entraîner un remaniement et un transfert de sédiment vers le chenal, de l'ordre de 1 à 1,5 % de la masse du bouchon vaseux, au cours d'un seul cycle semi-diurne.

3.3. Validation des résultats par modélisation

Un modèle numérique semi-empirique simulant les séquences d'érosion/dépôt de sédiments fins sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine a été développé en collaboration avec R. Verney (UMR CNRS 6143 M2C). Ce modèle 0D ou point simule uniquement les variations topographiques de la vasière et ne s'attache pas à modéliser le transport sédimentaire dans la colonne d'eau.

L'objectif de ce travail est de valider les hypothèses proposées pour le fonctionnement de la vasière d'embouchure de l'estuaire de la Seine. Ce modèle s'inspire des travaux de Cappucci et al. (2004), qui ont proposé un modèle simplifié du fonctionnement/transport des particules fines dans la lagune de Venise.

Ce modèle se base sur la connaissance du fonctionnement de l'estuaire de Seine et de la vasière d'embouchure (Lesourd, 2000 ; Le Hir et al., 2001 ; Da Silva, 2002 ; Deloffre et al., accepté ; Verney et al., 2005a ; 2005b) ainsi que sur les données des principaux paramètres de contrôle du transport de sédiments fins disponibles à l'embouchure de l'estuaire de Seine : les données du réseau de surveillance MAREL, les données Météo-France au cap de la Hève et les données hydrodynamiques acquises sur la vasière d'embouchure (Fig. III-6). Les résultats du modèle sont alors comparés aux données de variations topographiques de la vasière d'embouchure à l'échelle annuelle.



Figure III-6 : Schéma simplifié du fonctionnement du modèle hydrosédimentaire de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine.

3.3.1. Les entrées du modèle

Le vent : Les données de vent (intensité et direction) sont fournies par la station Météo-France du Cap de la Hève. Les données sont moyennées, produisant une donnée toutes les 3 heures. A l'embouchure de l'estuaire, la direction efficace du vent est Ouest-Sud-Ouest (Da Silva, 2002). Pour cette raison, le modèle prend en compte uniquement les vents d'une direction comprise entre 230 et 290°. Les autres secteurs sont considérés comme n'ayant pas d'impact sur le fonctionnement de la vasière intertidale d'embouchure. La hauteur significative des vagues est alors calculée en se basant sur les données de terrain acquises par l'ADV proche de la station de mesure ALTUS (Verney *et al.*, 2005a ; 2005b).

Vitesse du vent (m.s ⁻¹)	Hauteur significative des
	vagues (Hs en m)
5	0-0,5
7,5	0,05-0,1
10	0,1-0,12
15	0,12-0,15
20	0,15-0,18
>20	0,18-0,2

Tableau III-A : Correspondance utilisée dans le modèle entre vitesse du vent et hauteurs significatives des vagues.

Hauteurs d'eau : Les hauteurs d'eau sur la vasière sont issues des données de hauteurs d'eau de la bouée MAREL Honfleur, localisée dans le chenal central perpendiculairement à la station d'étude, à une

fréquence de 1 donnée toutes les 10 minutes. Ce paramètre est recalé en fonction de l'altitude de la station de mesure sur la vasière, en se basant sur les données de hauteurs d'eau mesurées par l'altimètre.

Turbidité : la turbidité sur la vasière au cours de chaque cycle de marée est calculée en fonction des valeurs de la bouée MAREL Honfleur. La turbidité sur la vasière est estimée identique à celle sur la vasière d'embouchure.

3.3.2. Paramètres fixes

Le modèle nécessite de considérer des paramètres fixes, la valeur choisie pour ces paramètres est soit issue de la bibliographie ou des mesures de terrain. Selon Lafite (2001), la vitesse de chute moyenne (Ws) est de 1 mm.s⁻¹, ordre de grandeur pour les particules fines en estuaire de Seine (Fig. I-17). En se basant sur les données terrain, le dépôt s'effectue sur la vasière lorsque la concentration dans la masse d'eau est supérieure à 1 g.l⁻¹ dans la colonne d'eau. Le sédiment déposé correspond à une vase fluide (densité humide de 1200 g.l⁻¹), ordre de grandeur mesuré sur le terrain. Ce sédiment est susceptible de se tasser, ce tassement s'effectue suivant les données expérimentales acquises. En fonction du temps et de la succession des épisodes de dépôt et d'érosion un profil vertical du degré de cohésion du sédiment est effectué. Ce dernier est pris en compte lors des processus d'érosion sur la vasière. Enfin, le dépôt s'effectue sous la condition que la contrainte critique au fond est inférieure à 0,6 N.m⁻², ordre de grandeur moyen observé par l'ADV lors des travaux sur cette vasière. Enfin, La contrainte critique d'érosion est calculée en fonction des propriétés du sédiment, des courants de marée et des vagues d'agitation, selon l'équation proposée par Mitchener et Torf (1996). Le taux d'érosion est alors de 4,12.10⁻⁴ Kg.m⁻².s⁻¹.

3.3.3. Paramètres calculés à chaque itération

Compartiment hydrodynamique : la vitesse des courants sur la vasière d'embouchure est calculée de façon simplifiée. Elle est calculée en fonction de la progression de l'onde de marée au cours du temps. Bien que simpliste, cette méthode de calcul présente des ordres de grandeur similaires à celles obtenues par les mesures ADV au niveau de la station de mesure.

U=
$$dh/dt$$

La contrainte de cisaillement est obtenue en calculant les contributions du courant et des vagues. La contrainte de cisaillement au fond induite par le courant est calculée en fonction de la vitesse des courants et du coefficient d'entravement (cd). Ce dernier est estimé à partir des mesures de terrain sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine ; dans ce cas, cd=0,0026.

 $Tc = \rho * cd * u^2$

La contrainte de cisaillement au fond, liée aux vagues, est calculée à partir des hauteurs d'eau significatives :

$$Uw=Hs/2*(g/h)^{0.5}$$

Ensuite, le modèle proposé par Soulsby (1995) est appliqué, Verney et al. (2005b) ayant démontré que son utilisation est particulièrement robuste pour la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine. La rugosité du fond (z0) est estimée à demi excursion orbitale : 120 µm (Verney et al., 2005b),

Tw=0,5 e*fw*Uw²
Avec : fw=1,39 (A/zo)^{0.52} ;
$$\tau_{CW}=(T_W^2+Tm^2)^{0.5}$$
 ; Tm= $\tau c(1+1.2*(\tau w/(\tau w+\tau c)^{0.32}))$

Compartiment sédimentaire : il est nécessaire de prendre en compte l'évolution du degré de cohésion du sédiment au cours du temps. En effet, ce paramètre influence l'impact des vagues d'agitation en période de dépôt (teneur en eau de 200%), l'érosion est plus importante comparativement aux périodes d'érosion, période où le sédiment est consolidé (teneur en eau de 85%). La prise en compte du tassement du sédiment est effectuée selon les résultats acquis précédemment, mais ne concerne que l'évolution de la teneur en eau. Aucune correction de l'altitude de la vasière par effet du tassement n'est intégrée (Deloffre et al., accepté ; Chapitre III 3.1., Fig. III-7).



Figure III-7 : Evolution de la densité humide du sédiment au cours du temps générée par le tassement du sédiment de la vase fluide sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine.

A chaque itération, le tassement de la colonne sédimentaire est pris en compte pour la mesure de la contrainte critique d'érosion, en fonction de la densité du sédiment, en se basant sur les équations de Mitchener et Torfs (1996). Lorsque le sédiment se dépose, il correspond à une crème de vase d'une densité humide de 1200 g.l⁻¹ (correspondant à une densité sèche de 300 g.l⁻¹).

$$T_{ce} = E_1(\rho b - \rho w)^{E2}$$
 avec $E_1 = 0.015$ et $E_2 = 0.73$

Equation constitutive du modèle : le modèle est basé sur une interdépendance des processus (Cappucci et al., 2004), en simplifiant les processus réels : érosion et dépôt ne peuvent se produire en même temps. Le modèle simule le dépôt lorsque la contrainte critique de dépôt est atteinte, si elle ne l'est pas, les processus d'érosion sont considérés :

Erosion : $dM/dt=Mo(\tau cw-\tau ce)$ avec Mo=4.12 10-4 m⁻².s⁻¹ **Dépôt :** dM/dt=Ws*Cmes

3.3.4. Comparaison des résultats du modèle et des mesures altimétriques

Le modèle permet de simuler les variations topographiques sur la station de mesure de référence (Fig. III-9) sur la vasière intertidale de l'estuaire de Seine.



Figure. III-8 : Comparaison des données du modèle et de l'enregistrement altimétrique sur la vasière (données brutes).

Bien que le modèle soit particulièrement sensible aux données de MES acquises par la bouée MAREL Honfleur, les résultats permettent de valider les hypothèses concernant les forçages de dépôt et d'érosion, proposées par Deloffre et al., (2005b). Bien que le modèle ne reproduise pas parfaitement les amplitudes observées sur le terrain, une sédimentation est obtenue au cours des périodes de plus fortes vives-eaux (Fig. III-8).

Les données acquises sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine ont également permis de valider le modèle numérique SiAm 3D sur l'estuaire de Seine (Ifremer Physed, Brest ; Brenon, 1997 ; Le Hir et al., 2001 ; Waeles et al., 2005).

4. PUBLICATION

Deloffre J., Lafite R., Lesueur P., Verney R., Lesourd S., Cuvilliez A. et Taylor, J., 2005. Controlling factors of rhythmic sedimentation processes on an intertidal estuarine mudflat - Role of the turbidity maximum in the macrotidal Seine estuary, France. *Accepté à Marine Geology, Tidalites 2004 Special Issue*.

Controlling factors of rhythmic sedimentation processes on an intertidal estuarine mudflat - Role of the turbidity maximum in the macrotidal Seine estuary, France

Deloffre J. ^{a*}, Lafite R. ^a, Lesueur P. ^b, Verney R. ^a, Lesourd S. ^c, Cuvilliez A. ^a and Taylor, J.^d

^a UMR CNRS 6143, Morphodynamique continentale et côtière, Université de Rouen, 76821 Mont-Saint-Aignan Cedex, France.

^b UMR CNRS 6143, Morphodynamique continentale et côtière, Université de Caen, 14000 Caen Cedex, France.

^e UMR CNRS 8013 ELICO, Laboratoire de Biogéochimie et Environnement du Littoral, Université du Littoral-Côte d'Opale, 62930 Wimereux, France.

^d Coastal and Estuarine Research Group, School of Life Sciences, University of Sussex, Falmer, Brighton, BN1 9QJ, U.K.

Keywords : Intertidal mudflat, turbidity maximum, tidal cycles, river flow, waves, Seine estuary.

* Corresponding author

Phone: +33 2 35 14 66 62, Fax: +33 2 35 14 70 22, e-mail: julien.deloffre@etu.univ-rouen.fr
ABSTRACT

The aim of this study is to analyse and to quantify the fine particles transfer (i.e. $< 63\mu$ m) in the marine part of the man-altered macrotidal Seine estuary (France) by (i) an analysis of a two year time-series of altimeter data, which reveals the bed-elevation variations on an intertidal mudflat located at the Seine mouth and (ii) measurements of the concentration of suspended particulate matter (SPM) contained within the turbidity maximum (TM). The results of this analysis reveal that sedimentation on the mudflat is mainly controlled by the dynamics of the TM such that during the largest spring tides (i.e. tidal ranges> 7.1 m). Then, deposition of SPM from the turbidity maximum becomes important, allowing fine particles to settle on the mudflat, where the current velocities are low (< 0.4 m.s⁻¹). On tides of lower range (< 7.1 m) bed elevation levels suggest that erosion of the mudflat surface dominates, however dewatering processes also occur in the soft mud deposits resulting in compaction. During periods of wave activity and periods of increasing river discharge, the mudflat surface experiences rapid erosion. These periods of erosion (sudden or progressive) imply a transfer of fine-grained material from the mudflat surface back into the TM.

The long term (~22 months), high-frequency (1 measurement every 10 minutes) and high resolution (0.6 mm) dataset obtained from the altimeter allows quantification of the volume of material exchanged between the intertidal area and the estuarine standing stock of SPM. The maximum of deposition on the studied mudflat during the study was of 27 cm, with highest deposition occurring after the periods of highest river flow and implying that between 25 and 40% of the maximum estimated mass of SPM held within the estuarine TM (300,000-500,000 T) had been temporarily deposited on the mudflat. Likewise following periods of resuspension by wave activity, bed elevations reduced by an order of ~1 cm, suggesting a release of between 1-1.5% of the TM load from the mudflat back into suspension.

The study shows that lateral exchanges of sediment between the intertidal reaches of the estuary and the water column are an important part of the sediment budget, and that the supply of sediment available for deposition (i.e. the TM) has a causal relationship with sedimentation rates experienced by intertidal mudflats.

INTRODUCTION

In estuarine environments, areas of sedimentation of fine-grained particles (< 63 μ m) are particularly sensitive to morphological evolution of the system. Tidal flats located in marine or brackish regions of estuarine systems have been the focus of numerous studies and classifications (e.g. Amos, 1995; Perillo, 1995; Dyer *et al.*, 2000, , Uncles, 2002). Deposition and resuspension processes within the TM have also been described (e.g. Avoine *et al.*, 1981) and modelled (e.g. Uncles *et al.*, 1998, Le Hir *et al.*, 2001; Fettweis and Van den Eynde, 2003; Mitchell *et al.*, 2003). Most of these studies are, however, based on short-term field measurements (i.e. spring-neap) or through modelling of hydrodynamic and sedimentary processes (e.g. Dyer *et al.*, 2004). Few works exist using high resolution and long-term measurements (Christie et al., 1999; O'Brien et al., 2000; Bassoullet et al., 2000). However the recent development of estuarine watch networks permit the acquisition of long term datasets.

The present study on the Seine estuary is dedicated to understanding sedimentary processes at different time scales from semi-diurnal to annual scales. The aim of this study is to determine the parameters controlling processes of sedimentation and erosion on the intertidal mudflat located at the mouth of the estuary and to quantify the fine particles fluxes. In this part of the Seine estuary, fine particles can be stored in the TM (Avoine *et al.*, 1981), within intertidal mudflats (Lesourd *et al.*, 2001) or among temporary subtidal deposits (Garnaud *et al.*, 2003; Lesourd *et al.*, 2003). The TM plays an important role for sediment supply. This long term (~22 months), high frequency (1 measurement every 10 minutes) and high resolution (accuracy of 0.2 cm and resolution of 0.06 cm) investigation, undertaken simultaneously on the mudflat and in the TM is designed to determine their precise relationships.

STUDY AREA

The Seine estuary is macrotidal (8.0 m tidal range at Le Havre, Fig. 1) with tidal conditions penetrating a distance of 160 km inland, whilst the mean annual river flow averaged over the last 50 years has been estimated at 450 m³.s⁻¹. In the last century the estuary's mouth has been heavily engineered (Lafite and Romaña, 2001), with the construction of dykes either side of the main estuarine channel. These structures have resulted in a highly controlled system (Avoine *et al.*, 1981; Lesourd *et al.*, 2003), including:

(i) a strong reduction in the area of the tidal flats; (ii) a decrease in the volume of the estuary below the spring tide high water level; (iii) a downstream shifting of the locus of the TM; (iv) a local increase in the depth of the main channel (i.e. the navigation channel) in the lower estuary; and (v) the establishment of a system of 3 channels at the mouth: a northern channel that bounds the studied mudflat, a flood-dominated southern channel and a main dredged channel (Fig. 1 and 2).

The TM at the mouth of the Seine estuary is well developed; its maximum mass is estimated to be between 300,000 and 500,000 T (Avoine *et al.*, 1981) with maximum concentrations in the surface waters ranging between 1 to 2 g. Γ^1 (Le Hir *et al.*, 2001). Most of the fine particles stored within the TM have been found to originate from within the catchment area (Dupont *et al.*, 1994). In the Seine estuary, the dynamics of the estuarine TM in response to hydrodynamic forcings have been previously described (Avoine *et al.*, 1981) and modelled (e.g. Brenon and Le Hir, 1999; Le Hir *et al.*, 2001). With the exception of periods of high river flows, it is mainly driven by the tides (Allen *et al.*, 1980). Over a semi-diurnal tidal cycle, flood and ebb tide currents act to resuspend fine particles within the TM, while over high water slack periods, the fine particles can settle. This behaviour is particularly well developed in the Seine estuary, due to the long (2 to 3 hours) stand at high water (Le Prevost *et al.*, 1986). As in other macrotidal estuaries (e.g. Uncles *et al.*, 2002), the amount of resuspended material and the development of the TM is largely a function of the tidal range, resuspension being less important during neap tides than on spring tides (Salomon and Allen, 1983; Brenon and Le Hir, 1999).

In the Seine estuary, however, the river flow also plays a role in controlling the dynamics of the TM. During periods of low river flows (< 300 m³.s⁻¹), the TM is located in the lower estuary upstream Honfleur whilst during periods of high river flows (> 900 m³.s⁻¹) the mid point of the TM is located 10 km seaward, and can even be expelled outside the estuary when river flows exceed 1,200 m³.s⁻¹. Moreover, the waves generated in the Bay of Seine can rapidly increase the amount of material resuspended within the TM. Because of the morphology of the mouth (Fig. 1), the waves coming from W-SW sector are particularly significant in this respect (Le Hir *et al.*, 2001).

Seasonal variations of the fine particle deposits in the marine estuary reaches of the Seine estuary have been previously described by Lesourd *et al.* (2003). These authors identified a long-term trend of accumulation of the fine sediment fractions. In addition they also identified a seasonal cyclicity of the fine-grained content of the sediments (silt and clay) within the mouth. During periods of high river flows, the

bulk of the fine sediment fraction is deposited in the subtidal areas seaward of the mouth. During low river flow periods, these fine sediments are reworked by wind-induced waves and a part is carried back into the lower estuary by flood tidal currents.

The mudflat studied here is subjected to the annual cycle of fine particles since it corresponds to the most extensive intertidal mudflat in the Seine estuary (\sim 3.2 km²). The mudflat is located on the right bank of the lower estuary (Fig. 2), and is mainly influenced by marine waters (salinity ~ 20). Fine-grained material (< 50 µm) makes up 70-90% of the superficial sediments of the mudflat (Lesourd, 2000); the carbonate content of the deposits is constant, at around 28-30%. Hoyez and Cuvilliez (2001) suggested that the mudflat could be divided into two main zones on the basis of morphological differences (Fig. 2). The two zones (downstream and upstream zones) have been considered in this study.

MATERIAL AND METHODS

1. Hydrodynamics and sedimentology of the mudflat

The evolution of the bed-elevation on the mudflat has been studied using an acoustic altimeter (Micrel-ALTUS, Jestin et al., 1998). The instrument was deployed on the upstream part of the mudflat (Fig. 1, station A) at the center of a cross-section running perpendicular to the main estuarine channel, at an initial height of 6.6 m above the reference sea level (Fig. 1). The altimeter instrument has been deployed over a 22-month period (24/07/01-15/05/03) at the reference station (station A). Previous studies (e.g. Lesourd, 2000; Lesourd *et al.*, 2003), showed that this location is representative of the mean behavior of the mudflat.

The altimeter is composed of a 2 MHz acoustic transducer, which measures the travel time of an acoustic pulse between the mudflat surface and the transducer. It was fixed at a height of 27 cm above the sediment surface at the beginning of the survey. The accuracy of the instrument is +/- 0.2 cm with a resolution of 0.06 cm (Jestin *et al.*, 1998). The MAREL buoy data have been used to correct the dataset acquired by the altimeter with respect to salinity and temperature in the water column based on McKenzie (1981) speed of sound in water equation.

Additionally, the altimeter was coupled to a pressure sensor to monitor the water heights above the mudflat (Bassoullet *et al.*, 2000). The resolution of this pressure transducer is 2 cm. Bed-elevation and water levels were sampled every 10 minutes, in order to access semi-diurnal tidal cycle variations. The accuracy of this type of acquisition system has been previously demonstrated in previous multi-disciplinary studies (Bally *et al.*, 2004; Leloup *et al.*, *in press*).

In addition to the instrument deployed at the reference site, and following the identification of the sedimentary processes prevailing on the mudflat, a second altimeter was deployed during a period of strong sedimentation at two other locations on the mudflat over a single spring-neap cycle (stations B and C, Fig. 1). The objectives behind these additional data-sets were (i) to identify the role of the channels traversing the mudflat (i.e. runnels, 1-3 m deep) in the supply of fine-grained sediment to the mudflat, since they act as a sink of fluid mud during low river flow periods (station B) and (ii) to compare the sedimentary behaviour between the upstream and downstream parts of the mudflat (station C). These data were in turn compared to those of the reference point (station A). The study of the processes occurring at the semi-diurnal scale required a higher frequency of acquisition, with 1 burst collected every 1-minute.

Turbidities were measured at each of the monitoring locations through the collection of water samples at 5 cm above the mudflat surface. The water samples were collected during the flood tide (i.e. during recovery of the mudflat) in order to obtain measurements of the sand and fine-grained fractions and SPM concentration. These data were obtained using standard sedimentological procedures.

Measurements of the near bed current velocities prevailing at the reference station were obtained during a period of low river flow conditions by means of a 6 MHz Nortek Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) (Kim *et al.*, 2000). The ADV measurement cell was located at 15 cm from the transmitter, and was set to measure at a height of 5 cm above the sediment-water interface.

2. Hydrodynamics and sedimentology of the turbidity maximum

The MAREL estuarine watch network has been established by IFREMER at the mouth of the Seine estuary since 1996 and comprises 4 multiparametric buoys, each measuring physicochemical parameters in the water column and meteorological conditions prevailing at the entrance of the estuary (Woerther, 1999).

For the purposes of the present study, data from the data-buoy located at Honfleur were used since it is located on the left bank of the Seine in the main channel, immediately opposite the study site (Fig. 1 and 2). The turbidity data recorded by the buoy is measured at a high frequency (1 burst every 10 minutes) and reveals the TM dynamics in this part of the lower estuary. The accuracy of the turbidity measurement is \sim 3%. Raw turbidity values are provided in NTU, the calibration based on a comparison between measurements and modeling indicates a 0.00128 coefficient between NTU and g.l⁻¹ units (Le Hir et Waeles, pers. comm.). Wind speed and direction from La Carosse meteorological station located out of the estuary (5 km seaward of the study site) has been used to provide data to assess the impacts of wave generated resuspension on the TM dynamics and the sedimentary evolution of the mudflat. The measurements are made over a 10 minutes period with the mean value of the relevant parameters reported every hour, the measurements accuracy on wind direction is 10° and 1 m.s⁻¹ for wind speed (Woerther, 1999).

RESULTS and INTERPRETATION

1. Calibration of the data acquired by the altimeter

Analysis of the dataset recorded by the altimeter allowed investigation of the topographic variations and suggests that three main sedimentary processes are contributing to the signal: sedimentation, erosion and dewatering. "Positive" topographic variations correspond to sedimentation periods whilst "negative" variations correspond to erosion and dewatering of deposited sediments. The dewatering process occurs as soon as the sediment is deposited on the mudflat (Fig. 3). Water contents of the superficial sediments range between 200%, during periods of deposition, and 70%, in erosion periods. Thus it is necessary to quantify the dewatering term: a laboratory study has been undertaken in order to evaluate the topographic evolution of sediment deposits caused by dewatering (Whitehouse et al., 2000). This study is based on the dewatering dynamics of fine-grained sediments as a function of time (Fig. 3). The experiment was undertaken over a 14 day-period (i.e. a spring-neap cycle) using samples of sediment taken from the mudflat. Measurements were carried out on several thicknesses of fluid mud (i.e. representative of the mud thickness as observed on the mudflat during one fortnightly cycle, from 2.5 to 10 cm). The results show that the topographic variations evolve according to a logarithmic law, which is a characteristic of the dewatering process (Terzaghi and Peck, 1967; Migniot, 1968). Dewatering of the sediment occurs rapidly over the two first days, and reaches a minimum after 7 days. At this time, the water content of the superficial sediments is ~85%. The topographic variations implied by this dewatering process are however important (i.e. maximum topographic variation of 2 cm). Dewatering profiles obtained from laboratory measurements on different thicknesses has been applied to the altimeter data-set. The decreasing of bed elevation measured during the laboratory experiment have been subtracted from the raw altimeter dataset at the time of maximum of deposition for each deposition period, following a consistent thickness between laboratory and field measurements. Thus the dewatering term has been removed from the raw signal following the deposit thickness allowing to access a quantification of deposition and erosion processes.

2. Evolution of the mudflat at the annual scale

The water levels measured at the reference site show dominance of tidal forces on the mudflat (Fig. 4), with tidal cycles of well-expressed semi-diurnal, fortnightly and 28 day periods (i.e. lunar cycles). A notable feature of the tidal curve at the site is the stand of the tide at high water period, which is most developed on spring tides. This feature arises from the interaction of the semi-diurnal lunar tide and its first harmonic and is a typical feature of the Bay of the Seine. As would be anticipated, the duration of immersion that the mudflat experiences is a function of the tidal range (from 150 to 300 minutes). The maximum water level observed in the dataset is 1.8 m at the reference site. Further analysis of the data suggests that water levels at the mudflat show little response to variations in river discharges. The observation period correspond to a period of higher than normal discharge variation in river flow, with daily mean river flows ranging from $115 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ to $1,800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, and a mean value of 650 m $^3.\text{s}^{-1}$ during the study.

The mudflat of the Seine estuary is highly dynamic and periods of stability are rare. Considering a single annual hydrological cycle (i.e. from one high river flow to another), the net elevation of the mudflat was observed to increase by 2 cm over a hydrological period. The maximum bed elevation observed during the study period was 22 cm (April 2002, Fig. 4) and 27 cm (May 2003) above the reference level. The altimeter records show these depositional periods to occur rapidly (from 3 to 7 days), with a thickness of several centimeters (2 to 8 cm) deposited in a single event. The associated sedimentation rates are therefore high (0.6 to 1.6 cm.d⁻¹), whilst the deposits show a tendency to be thicker during low river flows (mean of

5.5 cm) compared to the deposits formed during times of high river flows (mean value of 3.5 cm). Table 1 details the prevailing conditions and the characteristics of the depositional phases on the mudflat.

3. Evolution of the mudflat at a lunar tidal scale

The comparison of water levels at the site with the topographic variations suggests that the maximum sedimentation rates that occur on the mudflat occurred on the largest spring tides, when the maximum water level at the reference site was > 1.5 m (Fig. 4). The latest correspond to tidal ranges > 7.1 m. Such conditions are infrequent and occur on some 3 to 6 occasions each year and correspond only to a few sedimentation periods on the mudflat (Table 1). As the deposition of sediment on the mudflat is linked to the largest spring tides (Fig. 5) interspersed among erosive periods occurring during lower tidal ranges, the morphological evolution of the mudflat's depositional sequence is discontinuous and complex (Fig. 4).

Data from a second altimeter deployed on the downstream (i.e. western) part of the mudflat at a lower altitude (i.e. station C, + 5.7 m/sea level reference, Fig. 2) shows a depositional history that is both similar and synchronous (Fig. 5). This indicates that the processes are widespread on the mudflat. The sequence at station C begins as the tides reach their annual maximum range; it is apparent that the duration of the depositional cycle is somewhat longer at the downstream station of the mudflat (station C: 15 semi-diurnal cycles) than at the reference site (station A: 10 semi-diurnal cycles). The sediment deposition occurs under the same tidal ranges conditions, inducing a lag between the maximum of water level and the maximum of deposition.

Moreover the amplitude of depositional signals at station C is higher (6.2 cm) than at the reference site A (3.8 cm). The sedimentation rates at the semi-diurnal scale are however similar on both sites, respectively 0.45 cm and 0.38 cm, C and A respectively. These differences in the thickness of deposits may be due to: (i) the sediment supply being greater at station C than at A, which is supported by sampling of SPM in water samples 5 cm above the surface of the mudflat surface (650 and 400 mg.l⁻¹ respectively at C and A, 16/04/03) and/or (ii) the longer period of immersion at station C (the mean emersion duration is 250 minutes on the site A and 270 minutes on the station C) which would lead to a longer period of deposition. At the end of the monthly (lunar) cycle, the thickness of deposited sediment was however the same at the two sites: +1.5 cm.

4. Impact of waves event

Records of water level at the site suggest that wind waves generated in the Bay of Seine can induce surges, as much as 50 cm in amplitude. Figure 5 shows erosion periods generated during a period of W-SW wind with speed > 15 m.s⁻¹. Three events induced the erosion of layers of sediment 0.9 cm-thick (11/06/02), 1.2 cm-thick (23/10/02) and 1.6 cm-thick (02/04/03). It also evidences that the strongest period of erosion occurred a few days after that fluid mud layers (i.e. 23/10/02 and 02/04/03) were deposited on the mudflat, contrary to the erosion which occurred during the first event (June 2002) when the sediment on the mudflat had experienced consolidation.

During May 2002, winds at the entrance of the Bay of Seine were dominantly from the W-SW for a period of several days; this period of wave activity was also a potential depositional period (i.e. tidal range > 7.1 m). However, the altimeter time-series showed the mudflat to have been eroded to a depth of 1.4 cm (01/05/02) rather than experiencing deposition. Then, the impact of the wave activity acted to prevent deposition on the mudflat.

The measurements made over the period 11/04/03-11/05/03 (Figure 5) confirm this observation. During a wind event of 12 m.s⁻¹, 0.5 cm of sediment was reworked at the station C, without any evidence of erosion at the station A. Likewise during winds of 16 m.s⁻¹, a surge of 50 cm was observed at station C, 1 cm of sediments was eroded at the two sites (Fig. 5). As a whole, the erosion on the downstream part of the mudflat (station C) is more important than on the upstream one (station A).

5. Sediment supply

5.1 Relations between the mudflat and the turbidity maximum

The turbidity data from the MAREL buoy at Honfleur show the behavior of the Seine estuary TM in the main channel (Fig. 7). As is common with other estuaries (e.g. Uncles *et al.*, 2002) including the Seine (Avoine *et al.*, 1981, Brenon et Le Hir, 1999, Le Hir *et al.*, 2001), the continuous data obtained from this buoy demonstrate that the tidal dynamics have a strong influence on the TM behavior (Fig. 5). The dataset shows maximum turbidity values (> $1.95 \text{ g.}\Gamma^1$) to occur during the largest spring tides, as a result of the resuspension of the material settled during tides of lower range. This value is more important than those observed during other periods, including mean spring tides (Fig. 6). However, waves induced by strong winds (i.e. speeds > 15 m.s^{-1}) lead to enhance resuspension of fine-grained material (Fig. 6) and thereby to increase the turbidity levels in the water column. The annual variations in the TM are not entirely recorded by the MAREL Buoy at Honfleur since it is located at its landward edge at times of high river flows. The availability of data at Honfleur does however permit an insight of the hydrosedimentary model of the Seine estuary (Le Hir et al., 2001).

The comparison of the bed level evolution of the mudflat at station A with the turbidity of the surface water as measured in the main channel at MAREL Honfleur shows a close link (Fig. 7): when the turbidity at Honfleur reaches its maximum (> $1.95 \text{ g.} \text{I}^{-1}$) deposition occurs on the mudflat. During this period maxima values are recorded for: (i) current velocities during flood and ebb tides in the main channel (2.5 m.s⁻¹), (ii) water level on the mudflat (1.5 m), (iii) SPM concentrations above the mudflat ($400 \text{ and } 650 \text{ mg.I}^{-1}$ at stations A and C, respectively). At this time, velocities of currents above the mudflat remain however weak (< 0.4 m.s^{-1}), while the long (2-3 hours) high slack water is a favourable period for the settling of fine particles. As a result of all these conditions, the sedimentation rates on the mudflat (Fig. 7). This can have various causes: (i) wind events that induce an increase in SPM due to a higher turbulence that prevents deposition, (ii) due to a higher sensitivity to resuspension of the superficial material after periods of the highest spring tides (e.g. Fig. 7, April 2003), (iii) a difference of SPM concentrations between the main channel (MAREL buoy measurement) and the northern channel, that provides material to the mudflat.

Between these active depositional phases, when the water level on the mudflat falls below 1.5 m at high tides, the mudflat experiences a lowering of its bed level with erosion rates ranging from 0.04 to 0.17 cm.d⁻¹. The location of the TM in the lower estuary also has an influence on the amplitude and the frequency of deposition phases on the mudflat. At times when the TM is contained within the estuary during low river

flows, the resulting deposit thickness at the reference station is 5.5 cm, but reduces to only 3.5 cm during periods of high river flows when the TM is located at the mouth or even expelled outside the estuary. Moreover, it can be seen that over the 22 months of continuous monitoring, rapid erosion on the mudflat occurs at the beginning of each period of high river flows (Fig. 4). During the first winter (2001-2002), 1.5 cm of sediment was removed from the mudflat (not visible on Fig. 7), 3 cm were eroded during the second one (2002-2003). It is noticeable that both erosion phases occurred without periods of significant wind speeds. However they followed periods of deposition when the consolidation of the sediment transport budget (Fig. 4).

5.2 Relationships between the mudflat and the transverse channels

Transverse channels (i.e. runnels) crossing the mudflat are characterized by strong sedimentary evolutions at the seasonal scale. During low river flows, channels act to store fluid mud whilst during high river flow, they are empty and show an erosive trend (see Lesourd et al., 2003). In order to identify the influence of these transverse channels on the deposition of sediment on the mudflat, a study was carried out during a lunar cycle. It was based on two altimeters located respectively at a distance of 50 m (reference station A) and 150 m (station B) along a transect running perpendicular to a main runnel (Fig. 1). The measurements showed that depositional events on the mudflat are of the same amplitude and duration at the two sites (Fig. 8). During the periods of increasing tidal range (i.e. neap to-spring conditions) and during some 10 semi-diurnal cycles, the sediment settled on the mudflat (Fig. 8). For the remainder part of the survey, the data collected showed the bed level of the mudflat were stable at the two stations. However the sedimentation rates were very slightly higher at the Station A, the station close to the transverse channel, than at the more distant one (station B), depositional rates being of 0.7 and 0.6 cm/semi-diurnal cycle respectively. At the end of the monitoring period, the deposit thickness at site A attained 7.0 cm and only 5.9 cm at the station B (Fig. 8). This result was confirmed by the sampling of SPM in the water column (5 cm above the bottom) during a depositional phase (21/03/03). It clearly showed a decreasing turbidity with distance from the channel: 1,100 mg. l^{-1} in the channel itself, 400 mg. l^{-1} at station A and only 200 mg. l^{-1} at

station B. However since the accumulation of fluid mud within the channels is closely linked with dynamics of the estuarine TM, it corresponds to differential supply from the TM to the mudflat at the mouth of the Seine estuary. It can be suggest that this difference is linked to the supply of sediment from the transverse channels of the mudflat, the comparison of the thickness of the deposit between the two sites indicating that during this episode, nearly 25 % of the sediment supplied to the mudflat originated from the transverse channel.

During this short-term study, a rapid erosion of 1.6 cm at station A (30/03/03, Fig. 8) was noted. The meteorological data from the La Carosse MAREL buoy indicates that at this time, a 12 m.s⁻¹ wind event occurred. This erosion was not recorded at station B, located only 100 m downstream of station A. This difference is thought to be due to the composition of the superficial sediments, the sand fraction being more important at station A (mean content of 10-20% of fine sand in the upper 5 cm) than at site B (0%). During this event it is suggested that the nearest channel supplied the mudflat with sand rather than mud under the influence of the prevailing conditions: high river flow periods, high tidal ranges, turbidity maximum located in the downstream part of the estuary, channels devoid of fluid mud but filled with sand originating in the northern channel (Lesourd *et al.*, 2003). It can be seen in the field that this fine sand contributes to slight levees at the margins of the channels; this occur during flood tides at the overflowing of the mudflat, just before the high tide. Furthermore, more pronounced sand/mud laminations in the sediment were observed at the proximal station A than at the distal station B. These thin inter-layers of fine sand lead to an increase in the erosion of the mudflat under waves action (Da Silva and Le Hir, 2001).

DISCUSSION

The development of an instrumentation designed for the study of short-term mechanisms has allowed a significant progress in the understanding of estuarine fine sediment dynamics (Ockenden, 1993; Shi and Cheng, 1996; Whitehouse and Mitchener, 1998; Christie *et al.*, 1999; Bassoullet *et al.*, 2000). Based on high frequency and continuous time-series of bed elevation data over several seasonal cycles, this study aims to have a part in this progress. It has enabled an understanding of the depositional cycles on a mudflat in the lowest part of a major macrotidal estuary to be developed; it shows the various sedimentation and erosion processes that occur on the mudflat to take place at varying timescales: annual (hydrological cycle), lunar cycle, spring-neap cycle, and semi-diurnal cycle (O'Brien *et al.*, 2000). The rapid evolution of the mudflat of the Seine estuary shows the progress allowed by this type of instrumentation, compared to previous lower frequency (i.e. 10 days) studies (Frostick and McCave, 1979; Amos *et al.*, 1988; Kirby *et al.*, 1993). In addition, the comparison of the altimeter data with the turbidity data from the MAREL buoy has enabled the relationship between the mudflat and the turbidity maximum to be established and demonstrated that erosion/deposition cycles over the mudflat at the mouth of the Seine estuary are linked to the dynamics of the turbidity maximum.

The annual cycle of sedimentation shown by variations in river flows has been studied elsewhere (e.g. Uncles et al., 1998; Woodruff et al., 2001; Cooper, 2002; Deloffre et al., in press). Other processes emphasize the annual cycles on the intertidal mudflats as a result of: (i) the higher frequency of erosive wave events during winter (Petchik, 1992; Jing and Ridd, 1996; O'Brien, 2000; Andersen, 2001) and (ii) a restricted biological activity during winter allowing an increased consolidation of the mud (Frostick and McCave, 1979; O'Brien et al., 2000; Andersen and Pejrup, 2001). The present study shows several processes with a trend to preferential erosion during high river flows and preferential deposition during low river flows. Sedimentation rates are lower during high river flow periods due to the shifting of the TM to the mouth of the estuary. Conversely, during low river flows the TM is located in the study area of the mudflat and fluid mud is stored within transverse channels (Lesourd et al., 2003). This annual cyclicity is further emphasized by a higher frequency of erosive wave events during winter months (i.e. mostly during high river flow periods). In addition, tidal cyclicities are also recorded on the mudflat; they are mostly linked to the highest spring tides, especially spring and autumn equinox, when they correspond to low river flow periods during the studied period (i.e. March and September, Fig. 7). One could notice that the maximal bed elevation recorded on the mudflat occurred in April and May, after spring equinox and with low river flows (Fig. 7). Finally, the combination of lower sedimentation rates, lower occurrence of high spring tides during high river flows and an increase of wind activity during winter should result in an annual trend. However during summer 2002 (supposed to be under favorable conditions), no deposition was recorded between April and August because of the lack of the highest spring tides during this period.

The most common depositional cycle described in estuaries is the fortnightly neap-spring cycle (e.g. Whitehouse and Mitchener, 1998; O'Brien *et al.*, 2000; Uncles and Stephens, 2000). The depositional tendency during the highest spring tides seem to be characteristic of the Seine estuary. It has been shown to

be in relation to the TM's behavior, principally in terms of its SPM load which reaches its maximum during the highest spring tides. The dominance of resuspension processes within the TM area is in turn linked to the fine-grained nature of the sediments, which appears to be mainly composed of silts with a relatively low clay content in the lower Seine estuary (Lesourd, 2000); the silt fraction is highly mobile and consolidates rapidly. In addition, a main reason for the strongly cyclic nature of the depositional patterns derives from the high tidal range on the mudflat and to the unusually long high slack water period. This feature of the tidal dynamics, typical of this area of the English Channel, allows long periods (ca. 200 minutes) of very low tidal current velocities during high tides, and deposition of fine particles can occur onto the surface of the mudflat.

The results obtained here are valid for the two main studied areas of the mudflat of the Seine estuary: the comparison of the data obtained during highest spring tides underlines the synchronous tendencies of sedimentation and erosion phases. However some differences can be observed. Firstly, transverse channels in the upstream part of the mudflat allow the transfer of material from the main northern (i.e. longitudinal) channel to the mudflat, especially in spring tides. In the downstream part of the mudflat without runnels, the influence of agitation by waves predominates, leading to a higher tendency to erosion.

The data acquired in this study has allowed an estimation of the sedimentation and erosion fluxes on the mudflat at the mouth of the Seine estuary according to hydrological conditions. Considering both the data recorded in this study and a previous work of Lesourd (2000), an estimation of spatial (i.e. lateral and longitudinal) variations of the thickness of deposits on the distinct areas of the mudflat can be obtained. In addition, the extension of the deposits on the mudflat surface was monitored using an airborne orthophotographic campaign during a depositional phase, in April 2003. Analysis of the photogrammetric data recorded in this campaign showed that during this depositional episode, the sedimentation dominated an area of approximately 46% of the mudflat surface, which correspond to some 1.5 km². Considering: (i) the maximum thickness of fresh sediment on the mudflat (27 cm in May 2003) (ii) the dry bulk density of the Seine fluid mud (0.3 g.cm⁻³) and (iii) the data available in the present work, the maximum storage on the mudflat during the studied period is estimated to be ~120,000 T. This amount corresponds to 25 to 40% of the maximal mass of fine material trapped in the TM (estimated to be 300,000-500,000 T). Moreover, considering that a wind episode of 15 m.s⁻¹ magnitude can rework the surface of the mudflat down to ~1 cm (Fig. 8), integration of the data leads to the erosion of 4,500 T of sediment, which correspond to 1-1.5% of the TM's mass. The variations in thickness as measured on the studied mudflat of the Seine estuary are

comparable with those observed elsewhere (West and West, 1991; Whitehouse and Mitchener, 1998; Bassoullet *et al.*, 2000, O'Brien *et al.*, 2000; Andersen et Pejrup, 2001): several centimeters in the elevation of the mudflat surface. In addition, O'Brien *et al.* (2000) identified fast sedimentation rates in a similar macrotidal context (i.e. 10 cm in 2 weeks), which are comparable to those obtained in the present study. The calculated annual depositional fluxes (O'Brien *et al.*, 2000) are also comparable to those obtained in this study (200,000 T).

CONCLUSION

Comparison of high frequency measurements on the mudflat located at the mouth of the macrotidal Seine estuary and measurements from the MAREL watch network has enabled the description of the main sedimentary processes, and allowed a quantification of the fine particle flux in response to the principal forcing parameters (i.e. tides, waves and river flows).

At an annual scale, when the TM acts as the sediment supply of the mudflat and deposition periods correspond to largest spring tides, sedimentation rates are higher and more frequent during low river flow periods (the TM is located inside the estuary combined to equinox periods) than during high river flow periods (the TM is expelled outside the estuary). Moreover, probability of wind generated waves is more important in winter than in summer, though the impact of such high energy events are also driven by the water level on the mudflat and the bed shear stress. Deloffre *et al.*, in press demonstrated that the annual trend on the intertidal mudflats in the fluvial Seine estuary is opposite: deposition during high river flows and erosion during low river flows linked to the river discharges.

Through comparisons of water column SPM loads and morphological time-series, it has been demonstrated that the intertidal sedimentation patterns at the mouth of the Seine estuary are principally controlled by the TM dynamics. Elsewhere, the sedimentation rhythms on intertidal mudflats without significant river supplies have been attributed to the neap-spring cycles. In the present study, the main phases of deposition are linked to the highest spring tides. During tides of lower range (both lower springs and neaps) erosion dominates on the mudflat, with similar rates at the annual scale. Considering the thickness of the deposits laid down and their high water content (150-200%), the dewatering and consolidation processes

play a role in the mudflat evolution. These processes were measured in laboratory experiments and their signature removed from the altimeter time-series. The agitation by waves and river flows both contribute to the erosion of the mudflat, especially when the superficial sediments are fluid (i.e. fresh deposit). The erosion by waves can account for reductions of elevation from 0.5 to 2 cm for a wind with velocities of 15 $m.s^{-1}$.

The Seine river influences the erosive assessment, especially during high river flows. During the two periods of high river flows along the present study, rapid erosion was observed during the rising periods of the river flow. The TM was then located downstream the study site (i.e. in the mouth) and thus a less amount of fine sediment was available for deposition on the mudflat. The measures of the different altimeters deployed at the same period demonstrated that the processes of erosion and sedimentation are synchronous along the mudflat. However differences were shown: on the downstream part of the mudflat, the deposits are typically thicker during highest spring tides but wave action, to which this site is more exposed, may act to prevent deposition of the suspended material. On the upstream part of the mudflat, the impact of waves is less important whilst the channels which cross the mudflat (and which stores sediment during low river flows) act as a sink and a pipe for the supply of fine-grained sediment to the surface of the mudflat.

The long term and high frequency dataset obtained in this study allows quantification of the exchanges between the TM and the mudflat. The maximum storage (i.e. after high river flow periods) of fine-grained sediments on the mudflat corresponds to 25-40% of the maximum mass of the particles in the TM. Waves, which can induce erosion to a depth at least of 1 cm, can likewise lead to a transfer from the mudflat surface to the water column, that corresponds to 1-1.5% of the TM mass.

Finally, comparing these results to those obtained in previous studies, this work demonstrates the relevance of high-frequency and high-resolution measurements along continuous annual cycles for the prediction of the evolution of intertidal mudflats. Based on the knowledge of sedimentary processes, the present study is necessary for modelling and environmental management purposes.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out as part of the French interdisciplinary research program Seine-Aval (http://seine-aval.crihan.fr), supported by the following partners: the French State, the Haute-Normandie Region and the other Regions of the Paris basin, the Agence de l'Eau Seine-Normandie, and the industrial firms of the Haute-Normandie. This work has also been supported by the French PNETOX II program and the franco-british Rimew Interreg IIIA program (http://info1.scitech.sussex.ac.uk/rimew). Marel Buoy dataset was provided by IFREMER. The authors would also like to express their gratitude to Karen Tiphagne and Michel Simon for their assistance in the carrying out fieldwork.

REFERENCES

- Allen, G.P., Salomon, J.C., Bassoullet, P., Du Penhoat Y., De Grandpre, G., 1980. Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. Sediment. Geol. 26, 69-90.
- Amos, C.L., 1995. Siliciclastic tidal flats. In: G.M.E. Perillo (Ed.). Geomorphology and sedimentology of estuaries (pp. 273-306). Develop. in Sediment. 53. Amsterdam: Elsevier.
- Amos, C.L., Van Wagoner, N.A., Daborn, G.R., 1988. The influence of subaerial exposure on the bulk properties of fine-grained intertidal sediment from Minas Basin, Bay of Fundy. Es. Coast. Sh. Sci. 27 (1), 1-13.
- Andersen, T.J., 2001. Seasonal variation in erodability of two temperate, microtidal mudflats. Est. Coast. Sh. Sci. 53 (1), 1-12.
- Andersen, T.J., and Pejrup, M., 2001. Suspended sediment transport on a temperate, microtidal mudflat, the Danish Wadden Sea, Mar. Geol. 173 (1-4), 69-85.
- Avoine, J., Allen, G.P., Nichols, M., Salomon, J.C., and Larsonneur C., 1981. Suspended sediment transport in the Seine estuary, France: Effect of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology. Mar. Geol. 40, 119-137.
- Bally, G., Mesnage, V., Deloffre, J., Clarisse, O., Lafite, R., and Dupont, J.P., 2004. Chemical characterization of porewaters in an intertidal mudflat of the Seine estuary: relationship to erosiondeposition cycles. Mar. Poll. Bull. 49 (3), 163-173.
- Bassoullet, P., Le Hir, P., Gouleau, D., and Robert, S., 2000. Sediment transport over an intertidal mudflat: field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Marennes-Oleron" (France). Cont. Sh. Res. 20 (12-13), 1635-1653.
- Brenon, I., and Le Hir, P., 1999. Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): Identification of formation processes. Es. Coast. Sh. Sci. 49 (4), 525-544.
- Christie, M.C., Dyer, K.R. and Turner, P., 1999. Sediment flux and bed-level measurements from a macrotidal mudflat. Es. Coast. Sh. Sci. 49 (5), 667-688.

- Cooper, J.A.G., 2002. The role of extreme floods in the estuary-coastal behavior: contrast between river- and tide-dominated microtidal estuaries. Sed. Geol. 40 (150), 127-137.
- Da Silva Jacinto R. and Le Hir P., 2001. Response of stratified muddy beds to water waves. In Coastal and estuarine fine sediment processes, Proc. in Mar. Sc., W.H. McAnally and A.J. Mehta (Eds), Elsevier Science, 95-108.
- Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S., Verney, R., and Guézennec, L., in press. Sedimentary processes on a fluvial estuarine mudflat: the macrotidal Seine example (France). Es. Coast. Sh. Sci.
- Dupont, J.P., Lafite R., Huault M.F., Homméril, P., and Meyer R., 1994. Continental/marine ratio changes in suspended and settled matter across a macrotidal estuary (The Seine estuary, northwestern France). Mar. Geol. 120 (1-2), 27-40.
- Dyer, K.R., Christie M.C., and Manning A.J., 2004. The effects of suspended sediment on turbulence within an estuarine turbidity maximum. Es., Coast. Sh. Sci. 59 (2), 237-248.
- Dyer, K.R., Christie, M. C., Feates, N., Fennessy, M. J., Pejrup, M. and Van der Lee, W., 2000a. An investigation into processes influencing the morphodynamics of an intertidal mudflat, The Dollard Estuary, The Netherlands: I. Hydrodynamics and suspended sediments. Est. Coast. Sh. Sci. 50 (5), 607-625.
- Dyer, K. R., Christie, M. C. and Wright, E. W., 2000b. The classification of intertidal mudflats. Cont. Sh. Res. 20 (10-11), 1039-1060.
- Fettweis, M. and Van den Eynde D., 2003. The mud deposits and the high turbidity in the Belgian-Dutch coastal zone, southern bight of the North Sea. Cont. Sh. Res. 23 (7), 669-691.
- Frostick, L.E. and McCave, I.N., 1979. Seasonal shifts of sediment within an estuary mediated by algal growth. Est. and Coast. Mar. Sci. 9 (5), 569-576.
- Garnaud, S., Lesueur P., Clet, M. Lesourd, S. Garlan, T., Lafite, R., and Brun-Cottan, J.C., 2003. Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner-shelf setting (eastern Bay of the Seine, France). Mar. Geol. 202 (1-2), 33-54.

- Hoyez, B., and Cuvilliez, A., 2001. La grande vasière de l'estuaire de la Seine : typologie et cartographie, Soc. Géol. de Normandie, 88 (1), 36 pp.
- Jestin, H., Bassoullet, P., Le Hir, P., L'Yavanc, J., Degres, Y., 1998. Development of ALTUS, a high frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition and erosion of sediments. Oceans'98, Conference Proceedings, 1/3, 189-194.
- Jing, L. and Ridd P.V., 1996. Wave-current bottom shear stresses and sediment resuspension in cleveland bay, Australia. Coast. Eng. 29: 169-186.
- Kim, S.C., Friedrichs, C.T., Maa, P.Y., and Wright, L.D., 2000. Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic doppler velocimeter data. J. of Hyd. Eng., 126 (6), 399-406.
- Kirby, R., Bleakley, R.J., Weatherup, S.T.C., Raven, P.J., and Donaldson, N.D., 1993. Effect of episodic events on tidal mudflat stability, Armillan Bay, Strangford Lough, Northern Ireland. In Mehta, A.J. (Ed), Nearshore and Estuarine Marine Cohesive Sediment Transport, Coastal and Estuarine Studies, Vol. 42. Am. Geoph. U., Washington, DC, pp. 378-392.
- Lafite, R. and Romaña, L.A., 2001. A man-altered macrotidal estuary: The Seine estuary (France): Introduction to the special issue. Est., 24 (6B), 939.
- Le Hir, P., Ficht, A., Da Silva Jacinto, R., Lesueur, P., Dupont, J.P., Lafite, R., Brenon, I., Thouvenin, B. and Cugier, P., 2001. Fine sedimentation transport and accumulations at the mouth of the Seine Estuary (France). Est. 24 (6B), 950-963.
- Le Prévost, C., Fornerino, M. and Villaret C., 1986. Sur l'hydrodynamique de la baie de Seine. Résultats d'observation et de modélisation. P. 43-48. In GRECO-Manche (Eds.), La baie de Seine. Univ. de Caen 24-26 Avril 1985. Actes de colloque N°4. IFREMER, Brest.
- Leloup, J., Petit, F., Boust, D., Bally, G., Clarisse, O., and Quillet L., in press. Dynamic of sulfate-reducing microorganisms (dsrAB genes) in two contrasting mudflats of the Seine estuary (France), Microbial Ecology.
- Lesourd, S., Lesueur P., Brun-Cottan, J. C., Garnaud, S. and Poupinet, N., 2003. Seasonal variations in the characteristics of superficial sediments in a macrotidal estuary (the Seine inlet, France). Est. Coast. Sh. Sci. 58 (1), 3-16.

- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Auffret, J.-P., Poupinet, N. and Laignel, B., 2001. Morphosedimentary evolution of the macrotidal Seine estuary subjected to human impact. Estuaries, 24 (6B), 940-949.
- Lesourd, S., 2000. Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal: Zoom temporel du siècle à l'heure ; Application à l'estuaire de la Seine. PhD thesis, Univ. of Caen, 280 pp.
- McKenzie, K.V., 1981. Nine-term equation for sound speed in the oceans. Journal of the Acous. Soc. of Am. 70 (3), 807-812.
- Migniot, C. 1968. Tassement et rhéologie des vases. La Houille Blanche, Grenoble, Part I, Vol.1, p. 11-29.
- Mitchell, S.B., Lawler, D.M., West, J.R., and Couperthwaite, J.S., 2003. Use of continuous turbidity sensor in the prediction of fine sediment transport in the turbidity maximum of the Trent Estuary, UK. Est. and Coast. Sh. Sci. 58 (3), 645-652.
- O'Brien, D.J., Whitehouse R.J.S. and Cramp, A., 2000. The cyclic development of a macrotidal mudflat on varying timescales. Cont. Sh. Res. 20 (12-13), 1593-1619.
- Ockenden, M.C., 1993. A model for the setting of non-uniform cohesive sediment in a laboratory flume and an estuarine field setting. J. of Coast. Res. 9 (4), 1094-1105.
- Perillo, G.M.E., 1995. Definitions and geomorphologic classifications of estuaries. In: G.M.E. Perillo (Ed.).Geomorphology and sedimentology of estuaries (pp. 17-47). Developments in Sedimentology, 53.Amsterdam: Elsevier.
- Petchik, J.S., 1992. The geomorphology of mudflats. In K.F. Nordstrom and C.T. Roman eds.: Woley and Sons Ltd, Chechester, 185-211.
- Shi, Z. and Chen P.Y., 1996. Morphodynamics and sediments dynamics on intertidal mudflats in China (1961-1994). Cont. Sh. Res. 16 (15), 1909-1926.
- Terzaghi, K. and Peck R.B., 1967. Soils Mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons, New York.
- Uncles, R.J. 2002. Estuarine Physical Processes Research: Some Recent Studies and Progress. Est., Coast. Sh. Sci. 55 (6), 829-856.

- Uncles, R.J., Stephens, J.A., and Smith, R.E., 2002. The dependance of estuarine turbidity on tidal intrusion length, tidal range and residence time. Cont. Sh. Res. 22 (11-13), 1835-1856.
- Uncles, R.J. and Stephens J.A., 2000. Observations of currents, salinity, turbidity and intertidal mudflat characteristics and properties in the Tavy Estuary, UK. Cont. Sh. Res. 20 (12-13), 1531-1549.
- Uncles, R.J., Stephens, J.A., and Harris, C. 1998. Seasonal variability of subtidal and intertidal distribution in a muddy, macrotidal estuary: the Humber Ouse, UK. In Black, K.S., Paterson, D.M., Cramp, A. (Eds), Sedimentary Processes in the Intertidal Zone, Vol. 139, Geol. Soc. London, pp. 211-219.
- West, M.S., and West, J.R., 1991. Spatial and temporal variations in intertidal zone properties. In the Severn Eestuary, UK. In Elliot, M., Ducrotoy, J.P. (Eds.), Est. and Coasts. Alson and Alson, Fredensborg, pp. 25-30.
- Whitehouse, R.J.S., Le Hir, P., Bassoullet, P., Dyer, K.R., Mitchener, H.J., and Roberts, W., 2000. The influence of bedforms on flow and sediment transport over intertidal mudflats. Cont. Sh. Res. 20 (10-11), 1099-1124.
- Whitehouse, R. J. S. and Mitchener, H. J., 1998. Observations of the morphodynamics behavior of an intertidal mudflat at different timescales. In: Black, K.S., Paterson, D.M., Cramp, A. (Eds), Sedimentary Processes in the Intertidal Zone, Vol. 139, Geol. Soc. London, pp. 255-271.
- Woerther, P., 1999. Coastal water quality of the Seine bay area monitoring by a new french system of automated data buoys. EEZ technology: ICG Publishing Ltd, London.
- Woodruff, J.D., Geyer, W.R., Sommerfield, C.K., and Driscoll, N.W., 2001. Seasonal variations of sediment, Mar. Geol. 179 (1-2), 105-119.

CAPTION

Figures Caption

Fig. 1 : Location of the studied area at the mouth of the Seine estuary

Fig. 2: Airborne picture of the mouth of the Seine Estuary providing the morphological context of the studied area

Fig. 3: Evolution of the fluid mud dewatering during 14 days (for a 10 cm initial thickness of fluid sediment)

Fig. 4: Bed elevation, water level, wind event and high river flows on the Seine mudflat (station A) during long-term monitoring (24/07/01-15/05/03)

Fig. 5: Comparison of the processes at the station C and reference station A of the mudflat during a lunar cycle of deposit (11/04/03-11/05/03)

Fig. 6: Comparison between tidal range at Le Havre and resuspension in the turbidity maximum at Honfleur during spring cycle SSC=Suspended Sediment Concentration

Fig. 7: Relationship between the bed elevation on the mudflat (station A) and the turbidity maximum at Honfleur (24/07/01-15/05/03) SSC=Suspended Sediment Concentration

Fig. 8: Impact if the creeks inputs during one lunar cycle of deposit (13/03/03-12/04/03)

Table caption

Table 1 : Hydrodynamics conditions and main characteristics of the main deposition phases on the mudflat at the mouth of the Seine estuary during largest spring tides.

NA=not available (MAREL buoy maintenance).



Figure 1



Figure 2



Figure 3



Figure 4



Figure 5







Figure 7



Figure 8

Date of main	Deposit	Maximum Water level	Mean	Maximal SSC in the	Mean River flow
depositional events	thickness (cm)	on the mudflat (cm)	sedimentation	turbidity maximum	$(m^3.s^{-1})$
			rate (cm/day)	(MAREL buoy data in g. l^{-1})	
20/08/01-24/08/01	6.3	160	1.60	2.3	390
16/09/01-21/09/01	4.3	170	0.85	2.7	480
16/10/01-21/10/01	7.2	165	1.45	2.8	540
14/11/01-16/11/01	2.4	145	1.20	2.3	755
01/03/02-04/03/02	4.6	187	1.50	3.0	1650
06/09/02-11/09/02	5.8	155	1.15	2.5	215
03/10/02-11/10/02	4.4	150	0.60	3.3	200
04/11/02-06/11/02	2.7	155	1.35	2.7	560
03/12/02-07/12/02	2.5	160	0.65	3.1	590
17/02/03-21/02/03	5.1	150	1.00	NA	490
17/03/03-23/03/03	7.0	150	1.20	3.2	458
16/04/03-20/04/03	4.3	170	1.00	3.4	313

Table A

La vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine présente des rythmes de dépôts particuliers liés aux cycles de plus fortes vives eaux, en raison de la dynamique du bouchon vaseux de l'estuaire de Seine. Le chapitre suivant compare le fonctionnement de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine à celui de deux autres vasières localisées à proximité de l'embouchure, des estuaires de l'Authie et du Medway. Ces deux sites présentent des caractéristiques morphologiques et sédimentaires différentes de celles de l'estuaire de Seine.

CHAPITRE IV:

LES ENREGISTREMENTS SEDIMENTAIRES ET LEUR PRESERVATION AU SEIN DES VASIERES INTERTIDALES



- 1. Introduction
- 2. Objectifs et stratégie
- 3. Les mécanismes à l'échelle semi-diurne
- 4. Couplage des données altimétriques et lithologiques
- 5. Publication

1. INTRODUCTION

Les travaux précédemment décrits ont permis de mettre en évidence les relations étroites entre le fonctionnement du bouchon vaseux (et par conséquent la marée) et la vasière intertidale à l'embouchure de l'estuaire de Seine : la cyclicité de dépôt est liée aux cycles de marée des plus fortes vives-eaux (cycles lunaires). La dominance de ce type de cyclicités est rarement soulignée, soit dans les travaux sur le fonctionnement hydrosédimentaire actuel des vasières intertidales (Allen et McDuffy, 1998 ; Black et Paterson, 1998 ; Christie et al. 1999 ; O'Brien et al., 2000, Bassoullet et al., 2000 ; Whitehouse, 2000a), soit au travers d'études sur à la compréhension de la formation des rythmites tidales dans des environnements récents ou anciens (Dalrymple et al., 1978 ; Allen, 1981 ; Bartholdy et Pheiffer-Madsen, 1985 ; Yang et Nio, 1985 ; Kvale et al., 1989 ; Tessier et Gigot, 1989 ; Dalrymple et al., 1992 ; Tessier et al., 1995 ; Archer, 1996 ; Balouin, 1998 ; Fan et Li, 2002 ; Stupples, 2002 ; Choi et Dalrymple, 2004 ; Mazumder et Arima, 2005).

La comparaison du fonctionnement sédimentaire de vasières localisées dans la partie aval des différents systèmes macrotidaux (analysées de manière identique à celle de la Seine) permet d'avancer des éléments pour comprendre la dynamique et le potentiel de préservation des rythmites tidales dans ce type d'environnements.

2. OBJECTIFS

L'objectif de cette partie du mémoire est :

• de comprendre les mécanismes de dépôt et d'érosion sur les sites d'étude en fonction des contraintes hydrodynamiques, des apports sédimentaires et des propriétés des sédiments des vasières intertidales. Cette approche à l'échelle semi-diurne permet alors de déterminer les conditions de mise en place des lamines présentes dans les carottes sédimentaires.

• d'identifier les cycles de dépôt/érosion sur des vasières intertidales aval de trois estuaires macrotidaux en Manche (Authie, Seine et Medway) présentant des caractéristiques morphologiques et sédimentaires différentes (Fig. I-33 et paragraphe I-2.1.). Cette partie de l'étude porte sur des enregistrements altimétriques effectués à haute résolution et à long terme (une année de mesures) sur ces différents sites. Les enregistrements acquis à haute résolution par l'altimètre sont comparés aux successions de lithofaciès tels que définis par la technique d'imagerie par rayons X SCOPIX. Ce couplage permet d'associer les mesures topographiques à la surface de la vasière (érosions et dépôts) et la lithologie au sein des carottes sédimentaires (e.g. lamines, séquences de dépôt, surfaces d'érosion...).

3. LES MECANISMES A L'ECHELLE SEMI-DIURNE

3.1. Stratégie

Afin de mettre en évidence les relations entre les processus sédimentaires et l'hydrodynamique au niveau des vasières intertidales, un courantomètre ADV est déployé, en complément des mesures altimétriques à l'échelle annuelle. Deux fréquences d'acquisition sont utilisées selon deux protocoles d'acquisition en fonction de l'autonomie de l'ADV (Verney et al., 2005b; Verney, 2006). Soit respectivement :

- Suivi semi-diurne : ADV : acquisition à 32 Hz en continu ; ALTUS : acquisition de 1 mesure toutes les 3 minutes,
- Suivi semi-lunaire : ADV : acquisition à 2Hz en mode « burst », acquisition de 3 minutes toutes les 13 minutes ; ALTUS : acquisition de 1 mesure toutes 3 minutes.

Cette stratégie d'étude permet de suivre les mécanismes à l'échelle lunaire et de mettre en évidence le rôle du vent sur les vasières intertidales. Les techniques en mode continu et en mode burst permettent d'obtenir les contraintes de cisaillement liées à la turbulence de la masse d'eau à proximité du fond (Verney et al., 2005b ; Verney, 2006).

Les données acquises à l'échelle annuelle sur les vasières aval permettent de mettre en évidence les paramètres forçants sur chacun des sites et les périodes clefs de l'évolution des vasières intertidales. Les campagnes de mesures simultanées ADV-ALTUS ont alors été choisies afin de caractériser les différents comportements sédimentaires des vasières intertidales : la stratégie à court terme s'appuie sur l'expérience acquise par les mesures à long terme.

3.2. Résultats

Les données acquises à l'échelle annuelle sur les vasières marines mettent en évidence les rythmes de dépôt, les forçages de la sédimentation et de l'érosion sur chacun des sites ainsi que les périodes clefs de l'évolution de ces vasières intertidales. Le dépôt ou l'érosion se réalisent au cours des périodes de recouvrement à l'échelle du cycle semi-diurne. Ce volet s'attache à décrire ces mécanismes de dépôt et/ou d'érosion sur les sites d'étude à l'échelle du cycle semi-diurne, grâce à une acquisition haute fréquence des données. Les exemples présentés ont été acquis au cours des périodes de vives-eaux, qui correspondent aux périodes de dépôt maximal en Seine et en Authie, ce sont des périodes clefs de l'évolution morphologique de ces vasières.
3.2.1. L'estuaire du Medway

Les variations topométriques à l'échelle annuelle sur l'estuaire du Medway sont faibles (+/- 1 cm) : cette vasière est marquée par une stabilité. Les campagnes de mesure à l'échelle semi-diurne permettent de mettre en évidence les conditions hydrodynamiques et sédimentaires présidant à cette absence d'évolution.

Sur ce site, les vitesses de courants sont faibles, de l'ordre de 0,2 m.s⁻¹ au maximum au cours des périodes de flot et de jusant. Les contraintes de cisaillement générées par les courants sont faibles à proximité du fond, de l'ordre de 0,2 N.m⁻² en moyenne, le maximum est atteint au cours de la période de flot : 0,4 N.m⁻². En plus de cette hydrodynamique faible, la masse d'eau est peu turbide sur le site, en moyenne de l'ordre de 0,03 g.l⁻¹, en raison de l'absence de source sédimentaire. A l'échelle de l'estuaire, les transferts sédimentaires sont principalement décrits comme des échanges intra-estuariens (Kirby, 1990 ; Harisson and D'Olier, 1995 ; Reed, 1990). La vasière intertidale du Medway présente alors une stabilité à l'échelle du cycle de marée semi-diurne. Les conditions hydrodynamiques et sédimentaires, présentées pour les périodes de vives-eaux, sont similaires en période de morte eau. Sur le site étudié dans l'estuaire du Medway, et quelles que soient les conditions de marée et d'agitation dans l'estuaire, les conditions hydrodynamiques sont faibles. Dans cette partie de l'estuaire, cet hydrodynamisme faible est associé à des apports très faibles dans la partie aval de cet estuaire (Burd, 1989, 1992 ; Kirby, 1990 ; Petchnik, 1993 ; Pye and French, 1993 ; Spencer, 2000). Ces conditions hydrodynamiques et sédimentaires, observées à l'échelle semi-diurne, perdurent au cours de l'année et induisent la relative stabilité de la vasière à l'échelle annuelle sur le site d'étude.

3.2.2. L'estuaire de l'Authie

La vasière de l'Authie est caractérisée par une sédimentation nettement marquée à l'échelle de l'année et rythmée par le cycle de marée semi-lunaire. Ce site d'étude se situe dans un contexte protégé des vagues d'agitation : le forçage hydrodynamique principal sur ce site est le forçage tidal, les débits de l'Authie étant faibles. Ainsi, le site d'étude présente une sédimentation classique des zones protégées, dont le taux de sédimentation est fonction de l'amplitude de marée.

La forte concentration en MES dans la colonne d'eau (pic à ~1 g.l⁻¹) est associée à des courants de flot et de jusant modérés (respectivement <0,5 m.s⁻¹ et <0,4 m.s⁻¹) et à une turbulence faible (<0,5 N.m⁻²). La décantation des particules fines s'effectue alors au cours de la période de flot, et la vasière s'engraisse à ce moment du cycle (+0,5 cm). Au cours de la période d'étale de haute mer, la majeure partie des MES est décantée : au cours de cette période, la vasière est stable. La contrainte critique au fond varie peu au cours du cycle lunaire au niveau de la vasière. Toutefois, des périodes d'agitation liées à des évènements exceptionnels de courte durée peuvent se produire, ce type d'évènements ne semble pas avoir d'impact en terme sédimentaire, y compris en période de dépôt (Deloffre et al., soumis).

Les concentrations de MES sur la vasière sont plus importantes en vives-eaux $(1 \text{ g.}1^{-1})$ qu'en morteseaux $(0,1 \text{ g.}1^{-1})$. Ce mécanisme est lié à l'augmentation des conditions hydrodynamiques dans le chenal de l'Authie. En période de vives-eaux, la contrainte de fond est plus importante, et entraine une remise en suspension des sédiments fins plus importante : la vasière s'engraisse donc plus fortement en vives-eaux qu'en mortes eaux (Deloffre et al., soumis).

La vasière de l'Authie est typique des milieux estuariens protégés. En période de vive-eau, les apports sont importants (concentration pouvant atteindre $1g.1^{-1}$ sur la vasière), la vasière est en sédimentation. En période de morte-eau, les apports sont faibles (concentration < 100 mg.1⁻¹ sur la vasière), la vasière est stable. Ces résultats obtenus à l'échelle du cycle de marée semi-diurne sont cohérents avec les données acquises à l'échelle annuelle.

3.2.3. L'estuaire de Seine

• Les périodes de dépôt

L'évolution topographique sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine est complexe à l'échelle annuelle, caractérisée par un cycle lunaire de sédimentation, au moment des plus fortes vives-eaux, parfois masquée par une érosion due au vent ou au clapot (cf. Chap. III). L'identification des périodes clefs de l'évolution des vasières intertidales a permis de choisir les périodes d'études à l'échelle du cycle semidiurne afin d'observer ces différents processus sur le site de référence de la vasière.





En période de sédimentation, trois mécanismes constituent le signal topographique à l'échelle du cycle semi-diurne : la stabilité, la sédimentation, et l'érosion (Fig. IV-1).

Au cours des périodes des plus fortes vives-eaux et en étiage, les apports de particules fines depuis le bouchon vaseux sont importants, et les concentrations de MES atteignent ~ 1 g.l⁻¹ au cours du flot. La masse turbide est associée à une turbulence importante au fond due à une agitation liée au clapot en début de recouvrement. Puis la contrainte de cisaillement au fond décroît (< 1 N.m⁻²) en raison de l'augmentation de la tranche d'eau, l'impact de l'agitation est nulle au fond. Les particules en suspension décantent, et la concentration en MES décroît alors rapidement, pour atteindre des valeurs de l'ordre de 0,2 g.l⁻¹. Les particules s'accumulent et forment alors progressivement un dépôt de l'ordre de 1 cm, observable par l'altimètre (Fig. IV-4). Dans l'estuaire de Seine, le dépôt se fait sous la forme de vase fluide, avec une teneur en eau de 200%. La durée de l'étale de haute mer favorise le tassement de la vase fluide (-0,2 cm) et donc sa conservation au niveau de la vasière intertidale car au cours du reste du cycle semi-diurne, la turbulence demeure faible (0,2 N.m⁻²). Au cours de la période de jusant, la turbulence générée est insuffisante pour remettre en suspension le dépôt mis en place au cours de l'étale. Cet exemple confirme que le processus de tassement démarre très vite à la surface de la vasière, qui est favorisée, en estuaire de Seine par la durée importante de l'étale de haute mer.

Le cycle semi diurne présenté comme exemple est reproductible, il illustre pleinement le mécanisme de dépôt qui conduit à la séquence de sédimentation importante au cycle lunaire. Ce type de comportement a été vérifié sur différents cycles de marée semi-diurne, mais également en deux points de la vasière (haute et basse slikke). Deux paramètres semblent jouer dans le même sens, et contribuent à l'importance du dépôt :

- Le matériel sédimentaire issu du bouchon vaseux est un matériel caractérisé par une vitesse de chute forte donc rapidement décantable comparativement à d'autres estuaires (Lafite et al., 2001 ; Fig. I-18). L'origine de ces fortes vitesses de chute peut être reliée à la granulométrie du matériel, essentiellement silteux sur l'estuaire de Seine (Avoine, 1981) comparativement à d'autres bouchons vaseux, dominés par les argiles (e.g. Gironde, Castaing, 1981).
- La tenue du plein de 2-3 heures permet une décantation totale du matériel puis un début de tassement du sédiment qui va favoriser la consolidation du matériel à l'échelle du cycle semi diurne, dans cet estuaire où le jusant est hydrodynamiquement faible, bien que les mesures ne soient pas disponibles lorsque la hauteur d'eau sur la vasière est inférieur à 20 cm.

Rappelons que sur le site de l'Authie, la décantation des particules fines se fait au cours de la période de flot. Cette différence est liée au contexte hydrodynamique, comme en témoignent les contraintes de cisaillement importantes en flot sur l'estuaire de Seine (ordre de 1 N.m⁻²) et relativement faibles sur l'Authie (<0.5 N.m⁻²). L'hypothèse proposée est que les vagues de clapot, quasiment systématiquement présentes sur la vasière de l'estuaire de Seine lors de son recouvrement, génèrent une augmentation significative de la turbulence sous les faibles tranches d'eau concernées.

• Les périodes de stabilité

A l'échelle annuelle, les périodes de stabilité sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine sont rares. Ce comportement de la vasière intervient notamment lorsque la surface de la vasière est consolidée en période de morte-eau et de vive-eau faible et moyenne, avec des teneurs en eau <80%. La stabilité de la vasière est induite par une contrainte de cisaillement et une concentration en MES faibles, respectivement de l'ordre de 0.5 N.m⁻² et de 0,1 g.l⁻¹ (Fig. IV-2). Comparativement à l'estuaire du Medway, au cours des périodes de stabilité, les contraintes de cisaillement au fond sont plus élevées sur l'estuaire de Seine que sur le Medway, en raison de la présence de clapot quasi systématique sur l'estuaire de Seine.



Figure IV-2 : Variations des contraintes hydrodynamiques et sédimentaires au cours d'un cycle de marée de vive-eau moyenne sur la vasière de Seine.

Toutefois, les périodes de recouvrement et de découvrement pendant lesquelles la dynamique est forte (Fig. IV-2) entraînent des variations millimétriques du niveau de la vasière, indiquant une interface remaniée même au cours de ces périodes dites stables..

• Les périodes d'érosion/tassement

Les périodes d'érosion sont observées lorsque les vagues ou la houle se produisent. L'exemple présenté correspond à une agitation d'un vent de 8 à 10 m.s⁻¹ à l'embouchure, formant sur la vasière des vagues d'une hauteur significative de 0,15 à 0,3 m et d'une période de 6 à 8 s. Au cours de cette période, la

turbulence générée par les vagues est forte de l'ordre de 3 N.m⁻² et le sédiment est progressivement érodé sur 0,5 cm (Fig. IV-3).

L'impact de l'agitation sur le sédiment de la vasière dépend également de la cohésion du sédiment. L'étude des variations de la teneur en eau à l'échelle annuelle montre une forte variabilité du degré de consolidation du sédiment de surface, passant d'une vase fluide, d'une teneur en eau de 200% à une vase consolidée, d'une teneur en eau de 90%. Deux exemples (Fig.IV-4) montrent un comportement différencié de ces deux types de vases au cours d'un événement de vent, générant une turbulence au fond du même ordre de grandeur (3 N.m⁻²). Dans le cas d'un dépôt frais (W%=145%), le sédiment est plus érodé sur une épaisseur de 0,5 cm (Fig. IV-4A). Le sédiment consolidé (W%=90%), n'est pas érodé, seule la surface est remaniée (Fig. IV-4B).



Figure IV-3 : variations des contraintes hydrodynamiques et sédimentaires au cours d'un épisode de vent (8- 10 m.s^{-1} , période de 6-8 s, hauteurs significatives des vagues 0,15 à 0,3 m) sur la vasière de Seine.



Figure IV-4 : Influence du degré de cohésion du sédiment sur l'érosion générée par la houle sur l'estuaire de Seine. (A) en période de dépôt (période de vive-eau) ; (B) en période d'érosion (période de morte-eau).

3.2.4. Synthèse des processus à l'échelle semi-diurne

L'échelle semi-diurne est la période des mécanismes de dépôt et d'érosion. Le couplage des mesures altimétriques (ALTUS) et hydrodynamiques (ADV) a permis de mieux comprendre les processus gouvernant le fonctionnement des vasières intertidales à cette échelle élémentaire. Les données acquises sur les différents sites permettent de souligner :

• L'importance des périodes de recouvrement lors des apports sédimentaires,

- Le rôle du remaniement au cours du recouvrement et du découvrement (observé également au sein de l'estuaire fluvial). Au cours de chaque cycle de marée, quelques millimètres de sédiment sont remis en suspension, mécanisme primordial de la diagenèse précoce (cf. chap. V-1.4.).
- L'importance de l'agitation, notamment sur l'estuaire de Seine. D'une part, le clapot est quasisystématiquement présent sur la vasière d'embouchure. D'autre part, les mesures montrent une érosion importante au cours des épisodes de vent importants. L'occurrence et l'amplitude de l'impact des périodes d'agitation dépend de la qualité du sédiment et de la hauteur d'eau sur la vasière.
- La stratégie d'étude des mécanismes hydrosédimentaires à l'échelle semi-diurne ne permet pas d'obtenir des informations lorsque la hauteur d'eau est inférieure à 20 cm.

Cette étude se base sur la comparaison de 3 estuaires choisis dans des contextes sédimentaires et morphologiques différents : la baie protégée de l'Authie, l'estuaire du Medway appauvri en sédiment, et l'estuaire de Seine, présentant un bouchon vaseux important. Le fonctionnement des vasières est contrôlée par l'absence et la présence de sédiments fins mobiles et l'hydrodynamisme. La vasière du Medway ne présente pas d'érosion lié à la houle, sur ce site, il semble que son impact est faible. Ce constat associé à l'absence de source sédimentaire implique une stabilité de cette vasière à l'échelle du cycle semi-diurne et à l'échelle annuelle. Sur la vasière de l'Authie, l'apport de sédiment, issu du remaniement des particules de cet estuaire, est fonction de l'amplitude de marée (Deloffre et al., soumis). Cet estuaire se situe dans un contexte protégé, les périodes d'agitation sont exceptionnelles et ne semblent pas affecter la vasière, en raison de la cohésion relative du dépôt frais. Sur la vasière de Seine, différents mécanismes sont observés ; stabilité, érosion, tassement et sédimentation, ces mécanismes peuvent se produire au cours d'un même cycle de marée ou de cycles de marée consécutifs (Fig. IV-4). Les dépôts importants au cours du cycle lunaire sont causés par la disponibilité de la source sédimentaire, de la qualité du matériel qui décante rapidement puis se tasse rapidement au cours du cycle de marée semi-diurne. Ces mécanismes de décantation et de tassement sont favorisés par la contrainte hydrologique du système avec une pleine mer de 2 à 3 heures.

L'ensemble des données acquises dans ces trois estuaires permet de proposer un schéma simple de fonctionnement des vasières intertidales à l'échelle du cycle semi-diurne, en fonction de valeurs critiques seuils pour les apports de sédiment et l'hydrodynamique (contrainte de cisaillement au fond), ce schéma simplifié ne prenant pas en compte le rôle des propriétés du sédiment (Fig. IV-5).



Figure IV-5 : Schéma simplifié des processus sédimentaires à l'échelle semi-diurne en fonction de la concentration de MES dans la colonne d'eau et de la contrainte de cisaillement au fond. (L'ordre de grandeur des processus à la surface des vasières est indiqué).

L'étude des mécanismes hydro-sédimentaires à l'échelle du cycle semi-diurne permet donc de connaître les conditions nécessaires à la sédimentation pour chacun des sites d'étude.

4. COUPLAGE DES DONNEES ALTIMETRIQUES ET LITHOLOGIQUES

4.1. Stratégie

La comparaison du fonctionnement des vasières marines nécessite une stratégie d'étude identique sur chacun des sites. Un altimètre est positionné sur la zone de la moyenne slikke (altitude similaire : 5,5 à 6,5 m/0 CHM), pendant une année, l'acquisition est effectuée à des cadences de mesure à haute fréquence : 1 mesure toutes les 10 minutes (estuaires de Seine et de l'Authie) ou 20 minutes (estuaire du Medway). D'autre part, au cours de chaque campagne de terrain (tous les deux mois environ), une carotte sédimentaire (30 cm de long et 10 cm de diamètre) est prélevée sur un site à proximité de l'altimètre. Ce couplage est nécessaire des données altimétriques et lithologiques est nécessaire afin de mieux appréhender les rythmites au sein des environnements estuariens.

La comparaison des enregistrements altimétriques et des lithofaciès reconnus par les carottes radiographiées par la technique SCOPIX a été effectuée. La figure IV-6 présente un exemple de résultat d'une RX de carotte prélevée dans l'estuaire de Seine (Fig. IV-7-D; Lesourd, 2002) et comparée aux

enregistrements sédimentaires observés classiquement en milieux protégés (Fig. IV-6 A à C ; Tessier et al., 1995).



Figure IV-6 : *Comparaison des litages dans différents environnements tidaux (A à C : Tessier et al., 1995 ; D : Lesourd, 2002).*

(A) Baie du Mont-Saint-Michel, Actuel, France (diamètre de l'échelle : 2,8 cm).

(B) Argiles « de Lawrence » au Kansas, Carbonifère, USA (échelle verticale 1 cm).

(C) Formation « Brésil » en Indiana, Carbonifère, USA (échelle verticale 1 cm).

(D) Vasière intertidale de l'estuaire de Seine, France. Gauche : Positif de RX : Vases en clair, sables en sombre. Droite : Log lithologique représentatif.

(A), (B) et (C) : Les flèches indiquent les lamines imputées aux périodes de morte-eau. Lamines argileuses en sombre.

Cette figure illustre la difficulté d'interpréter la dynamique d'enregistrement des rythmites tidales au sein de vasières intertidales semi-ouvertes, comparativement aux données acquises dans des environnements protégés. La majorité des travaux sur les rythmites tidales s'attachent à comprendre la dynamique d'enregistrement des lamines en les corrélant aux cycles tidaux en milieux protégés. La stratégie d'étude choisie ici, est basée sur l'interprétation de l'enregistrement vertical sur les sites d'étude, zones plus défavorables à un enregistrement sédimentaire continu. L'objectif est de relier la structuration sédimentaire dans les carottes aux cyclicités tidales enregistrées par l'altimètre. Cependant les enregistrements dans les vasières intertidales estuariennes sont difficilement interprétables, comme observé par Balouin (1998). Cette difficulté varie avec le site et peut être liée à de faibles variations de la granulométrie du matériel des vasières étudiées, à l'importance de la bioturbation, entraînant une déstructuration partielle ou complète des structures physiques et aux périodes d'érosion, liées à l'agitation érodant une partie du matériel déposé

(troncature des dépôts, lacunes et faible préservation). Dans ce cas, le couplage des donnéeses données altimétriques et des données lithologique, obtenues par imagerie SCOPIX, est nécessaire. Cette approche novatrice, basée sur des données acquises à haute résolution, permettent de corréler finement les faciès lithologiques (lamines, séquences de dépôt, surfaces d'érosion...) et les données altimétriques (Fig. IV-7). La finalité de ce couplage étant de comprendre les modes de comblement des vasières intertidales en milieu estuarien (cf. Chap. IV-4.2).



Figure IV-7 : Comparaison des enregistrements altimétriques et de lithologie de la partie sommitale (premiers centimètres) d'une carotte sédimentaire prélevée sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine prélevée le 27/08/01.

4.2. Résultats

Les résultats des variations topographiques montrent des tendances morphodynamiques différentes en chacun des sites. A l'échelle annuelle, la vasière du Medway est stable, l'amplitude des variations altimétriques est de l'ordre de 1 cm. A cette échelle de temps, les vasières de l'Authie et de la Seine montrent une sédimentation d'amplitude plus importante et similaire, respectivement de 15 et 18 cm.an⁻¹. Les résultats montrent l'importance de la source sédimentaire sur le fonctionnement des vasières intertidales : alors que le sédiment fin n'est pas disponible sur la vasière du Medway, des transferts du sédiment fins permettent une accumulation au sein des vasières intertidales aval de la Seine et de l'Authie. Toutefois, les rythmes de dépôts sont différents sur ces deux vasières, en raison d'un fonctionnement sédimentaire différent dans la partie marine des estuaires. Le bouchon vaseux est bien développé au cours de toutes les périodes des plus fortes vives-eaux, périodes auxquelles la sédimentation sur la vasière est effective. Sur l'estuaire de l'Authie les particules fines remises en suspension, sont disponibles au cours de toutes les périodes de vives-eaux. Ainsi, la cyclicité des dépôts sur l'Authie montre une évolution régulière et continue sur cette vasière, alors que la cyclicité de dépôt sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine montre une évolution discontinue (cf. chapitre III). Cette discontinuité est encore renforcée par l'influence de l'agitation (houle, mer de vents locaux) sur l'estuaire de Seine qui induit des phases brutales d'érosion. Par comparaison, les vasières de l'estuaire de l'Authie et l'estuaire du Medway semblent peu sensibles aux houles, les sites d'étude étant localisés en contexte protégé. Finalement les données d'altimétrie acquises sur les différentes vasières soulignent l'importance des relations entre hydrodynamisme, source sédimentaire et transport des particules fines.

Pour interpréter les structures sédimentaires (lamines et séquences sédimentaires) par rapport à la dynamique tidale, les faciès obtenus sont comparés aux enregistrements altimétriques de la surface des vasières intertidales. La figure IV-8 présente un exemple d'interprétation d'une séquence sédimentaire.





<u>Nota</u>: Sur cet exemple, la bioturbation importante empêche le comptage des lamines qui composent la séquence de dépôt (cf. Fig. IV-6).

L'épaisseur des dépôts de la carotte prélevée le 11/05/03 et celle enregistrée par l'altimètre sont cohérentes (différence de 0,5 cm, Fig. IV-2). L'image SCOPIX permet de mettre en évidence deux surfaces d'érosion. La première au niveau de la partie basale des dépôts frais, soit d'origine tidale, soit liée au vent (vagues), elle se situe entre deux périodes de dépôt. La seconde est postérieure au dépôt frais sus-jacent, marqué par une teinte grise claire sur le positif de RX. En raison de sa faible consolidation, ce dépôt présente

encore une teneur en eau de 135% quelques jours après son dépôt (Lesourd, 2000). Ce dépôt est érodé sur 1,5 cm le 03/04/03 par l'action des vagues de vent.

Les enregistrements altimétriques sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine ont montré que les cycles de dépôt sont lunaires, correspondant aux périodes de plus fortes vives-eaux. Chaque séquence de dépôt , centimétrique voire pluricentimétrique observée au sein des carottes, est alors interprétée comme un dépôt de fortes vives-eaux. Cette interprétation indique que ces séquences ne correspondent pas à un enregistrement continu, mais à des périodes de forte sédimentation suivies de périodes d'érosion plus ou moins longues (quelques jours à plusieurs mois) et que la conservation d'une lamine de dépôt liée aux marées de plus fortes vives-eaux est dépendante de la durée et de l'intensité de l'érosion suivante (Fig. IV-9).



Figure IV-9 : Conservation des séquences de dépôt sur la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine à l'échelle de 5 mois.
(A) Conservation de 4 séquences de dépôt à l'échelle considérée,
(B) Aucune préservation des 5 périodes de dépôt.

L'enregistrement sur la vasière de la baie d'Authie correspond typiquement à un environnement de type protégé, et la sédimentation est gouvernée par le cycle semi-lunaire. Dans ce cas, l'enregistrement sédimentaire est moins discontinu qu'en Seine, toutefois, les périodes de plus faibles vives eaux ne permettent pas un dépôt suffisant de matériel pour être préservé (Fig. IV-10) : certains dépôts peu épais des périodes de plus faibles vives-eaux sont remaniés par les courants de marée. Enfin, en raison des faibles variations de la nature du matériel et de la bioturbation importante sur ce site (Amiard, 2005), les

enregistrements restent difficilement interprétables à l'échelle de la lamine. L'estuaire du Medway ne présente aucune structure physique, à l'exception du premier centimètre remanié au cours de l'année. La vasière du Medway est stable, sans apports sédimentaires significatifs.



Figure IV-10 : Comparaison des données altimétriques et la partie sommitale d'une carotte prélevée le 14/04/04 sur l'estuaire de l'Authie

La comparaison de trois vasières marines d'estuaires macrotidaux montre la pluralité des réponses des vasières intertidales aux contraintes morphologiques et sédimentaires. Ce travail souligne également que l'interprétation détaillée des lamines au sein des vasières intertidales actuelles est complexe. Toutefois, le couplage de l'analyse altimétrique et l'analyse lithologique permet d'interpréter les ensembles de lamines (liées au cycle semi-diurne) en terme de séquences de dépôt (semi-lunaire ou lunaire). Les trois sites des vasières d'estuaires étudiés montrent des dynamiques sédimentaires distinctes, dont le résultat correspond à différents taux de sédimentation nets : les 5 premiers centimètres de ces vasières peuvent correspondre à des pas de temps compris entre 3 jours (Seine) et 10 ans (Medway). Dans le cas du Medway, en raison de très faibles taux de sédimentation observés dans l'actuel, l'utilisation de radio-nucléides est nécessaire (Cundy et al., sous presse), cette méthode fournit un « taux de sédimentation moyen » au cours du temps. Toutefois, comme démontré sur l'estuaire de l'Authie et de Seine, la sédimentation dans les milieux intertidaux est discontinue.

La vasière du Medway est typique des estuaires appauvris en apports sédimentaires. La vasière de l'Authie est typique des environnements de baies protégés. La vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine apparaît alors atypique en raison de ses séquences de dépôt liées aux cycles de marée lunaire de plus fortes vives-eaux, dynamique directement liée au fonctionnement du bouchon vaseux de cet estuaire.

5. PUBLICATION

Deloffre, J., Verney, R., Lafite, R., Lesueur P., Lesourd, S., Cundy, A., *soumis à Marine Geology* (*Accepté en Aout 2006*). Sedimentation on intertidal mudflats in lower part of macrotidal estuaries: sedimentation rhythms and their preservation.

Sedimentation on intertidal mudflats in lower part of macrotidal estuaries: sedimentation rhythms and their preservation

Deloffre, J.^a, Verney, R.^a, Lafite, R.^a, Lesueur P.^b, Lesourd, S.^c, Cundy, A.B^d.

^a UMR CNRS 6143, Morphodynamique continentale et côtière, Université de Rouen, 76821 Mont-Saint-Aignan Cedex, France.

^b UMR CNRS 6143, Morphodynamique continentale et côtière, Université de Caen, 14000 Caen Cedex, France.

^e UMR CNRS 8013, ELICO, Université du Littoral-Côte d'Opale, 62930 Wimereux, France.

^d Coastal and Estuarine Research Group, School of Life Sciences, University of Sussex, Falmer, Brighton, BN1 9QJ, U.K.

Keywords: morphology; mud; rhythmites; altimeter; X-ray imagery; macrotidal estuary. e-mail: julien.deloffre@univ-rouen.fr

ABSTRACT

The objective of this study is to propose an original approach to analyse the formation of intertidal rhythmites, their preservation and the evaluation of sedimentation rates on estuarine mudflats. Based on the combination of long-term (> a year), high-frequency (1 burst/ 10 or 20 mn) and high-resolution (0.2 cm) altimeter datasets with X-ray images of sediment cores sampled during the topographic surveys, this study focuses on three mudflats.

Results enhance the roles of sediment supply, hydrodynamics and the morphology of the lower estuaries on the sedimentation rhythms. While the sediment-starved Medway estuary (Kent, UK) remains stable at different time-scales, the annual sedimentation rates on the sheltered Authie (Pas-de-Calais, France) and on the open Seine (Normandy, France) mudflats are important, respectively 18 and 15 cm.year⁻¹. On the Authie mudflat, sedimentation rhythms correspond to the semi-lunar cycle, with a good correlation between tidal range and deposit thickness. Sedimentation occurs at the beginning of the recovery (mean value of 0.25 cm per semi-diurnal cycle), and is never disturbed by wind-induced waves. In the lower Seine estuary, semi-diurnal mechanisms of deposition occur mainly when the mudflat is covered by a minimal water height (tidal range threshold value = 7.1m). Sedimentation rhythms are discontinuous and deposition occurs only during the highest spring tides. Mean deposit thickness is 0.6 cm per semi-diurnal cycle, in relation to the turbidity maximum and the long high tide slack (2-3 hours). However the fluid mud is sensitive to wind-waves in this open funnel-shaped estuary that experiences a wind-induced erosion (0.2 to 2 cm) about 10 times during a year.

Comparisons of altimeter dataset and lithology of the sediments cored at the same points permitted to better understand the sediment record rhythms and the sedimentation events. On the sediment-starved Medway mudflat, the result of sediment processes is a single superficial lamina. The elementary deposit in the Authie bay corresponds to a semi-lunar-linked layer as typical of sheltered environments. On the lower Seine mudflat, altimeter data and X-ray of cores shows sedimentation rhythms linked to the highest spring tides (i.e. the lunar cycle), in relation to the sediment availability due to the high suspended matter concentration in the turbidity maximum. At the end, this study underlines the complex response of intertidal mudflats to the hydrodynamics and sediment supply conditions, from the semi-diurnal to the annual scales.

INTRODUCTION

Tidal flats in marine or brackish parts of estuarine systems have been the focus of numerous morpho-sedimentary studies (e.g. Amos, 1995; Perillo, 1995; Black et al., 1998; Dyer, 1998 and Dyer *et al.*, 2000a, 2000b). Recent works using altimeter measurements have allowed a more detailed understanding of the morphological evolutions of intertidal mudflats over varying timescales. These studies underline the importance of cyclical evolution of intertidal mudflats elevation and morphology, either controlled by the tidal forcing (Christie et al., 1999; O'Brien et al., 2000; et al., Deloffre et al., in press) and high river discharges (Deloffre et al., 2005). Wind events (Bassoullet et al., 2000) and biological activity (e.g. Gouleau et al., 2000; Andersen and Pejrup, 2002) increase the complexity of the behaviour of these environments. Similar controls have been identified in studies of cyclic sedimentary facies (i.e. tidalites) in ancient and recent environments (e.g : Dalrymple et al., 1978; Tessier, 1993 ; Kvale et al., 1994; Archer, 1995 ; Tessier et al., 1995 ; Choi et Park, 2000; Stupples, 2002).

The sedimentological analysis of cyclical or rhythmic sedimentation on intertidal mudflats in estuarine systems is frequently complicated however by (i) the relative homogeneity of the material that settles, (ii) intensive bioturbation and (iii) physical removal of settled material due to high-energy events in the water column leading to erosion (West and West, 1991; Kirby et al., 1993; Schoellehammer, 1996; Bassoullet et al., 2000). Here, we propose an approach which combines high-resolution altimeter datasets with sediment core analysis, and use this to examine the sedimentary behaviour of intertidal mudflats in the lower part of three contrasting macrotidal estuaries: a mudflat in a typical sheltered bay (the Authie, France), a relatively stable mudflat in a sediment starved estuary (the Medway, U.K.), and a mudflat located in a system characterized by an highly concentrated turbidity maximum (the Seine, France).. The latest location was the focus of a previous work (Deloffre

et al., in press). The aim of this paper is to analyse the sediment processes linked to the different cycles on the mudflats and to compare them on the basis of (i) a long-term (a year at least), high-frequency and high-resolution topographic study with an acoustic altimeter, (ii) records of lithology in sedimentary cores sampled on each of the selected sites during the same survey periods. The altimeter datasets give necessary informations on the roles of (i) the morphology of the intertidal mudflats and (iii) the availability of sediment supply. The comparison of altimeter data with sediment lithology variations allows to investigate the occurrence and the preservation rates of tidal-induced deposits on the mudflats.

AREAS STUDIED

The Authie bay is a macrotidal system (maximum tidal range of 8.5 m at its mouth) located in the North part of France (Fig. 1B). The Authie mean annual river flow is 10 m³.s⁻¹, and it drains a 985 km² catchment area. This system is rapidly silting, but a main feature is the penetration of an important sand fraction originating from the English Channel (Anthony and Dobroniak, 2000). Morphologically, the Authie consists of a bay system protected by a sand bar (located in subtidal to supratidal domains) at its mouth, which shelters the estuarine system from storm swells (Fig. 1B). The main hydrodynamical feature is a fast infilling of the bay by the tide: during the low tide, most of the estuary, except the main channel, is sub-aerially exposed, and during the flood period there is significant resuspension of fine sediment. The Authie bay is considered to be a relatively "natural estuary", compared with other local systems, although some polders have been constructed, inducing a seaward salt marsh progression and increased sedimentation (Anthony and Dobroniak, 2000).

The macrotidal Seine estuary (maximum tidal range of 8.0 m at its mouth) is located in the Northwestern part of France (Fig. 1C). It forms one of the largest estuaries on the Northwestern European continental shelf with a catchment area covering 79,000 km². The mean annual Seine river flow, calculated during the last 50 years, is of 450 m³.s⁻¹. During the last two centuries, the Seine estuary has been significantly altered by human activity (Avoine et al., 1981; Lafite and Romaña,

2001; Lesourd et al., 2001). Intensive engineering works were undertaken between Rouen and Le Havre in order to improve the navigation. As a result, the lower Seine river was changed from a dominantly natural system to an anthropogenically-controlled one (Lesourd et al., 2001). Despite the highly dynamic nature of the system, tidal flats and salt marshes are still developed in the lower estuary, however the surface of intertidal areas has drastically decreased during the last 30 years (Lesourd, pers. comm.). The lower estuary zone is characterized by the presence of a distinct estuarine turbidity maximum (Avoine et al., 1981) that has a pronounced control on the sedimentation patterns on intertidal mudflats at the mouth (Deloffre et al., in press). One of the main hydrodynamics features in the Seine estuary is the 3 hours high water slack periods that can occurs at the mouth. This funnel-shaped estuary is exposed to the prevailing S-SW winds that make the intertidal regions of the mouth subject to erosion, under the combined effects of waves and currents (Verney, pers. comm.).

The macrotidal Medway estuary (maximum tidal range of ~5.6 m at the mouth) is located in the Southeastern part of England (Fig. 1) and today forms part of the wider Thames estuary system. The Medway river flow is 35 m³.s⁻¹, draining a 1,750 km² catchment area. Extensive intertidal flats and salt marsh islands characterize the lower part of the estuary, although much of salt marsh has been historically lost through the removal of material for brick making. From a sedimentological point of view, the Medway exhibits two distinct characteristics: the absence of sands on intertidal mudflats and the reworking of fine particles within the estuary. This last feature is a consequence of the absence of significant external sediment supply. While some mudflats are slowly accreting, erosion processes are dominant (Burd, 1989, Kirby, 1990 ; Pye and French, 1993).

MATERIAL and METHOD

1. Oceanographic instruments deployments

The sampling strategy was similar at each of the three mudflats studied. The instrumentation deployed on the mudflat consisted of a Micrel ALTUS altimeter, emplaced at a similar elevation in each estuary (4-6.5 m above the lowest sea level, i.e. on the middle slikke). This instrumentation measures bed elevation at high frequency (1 acoustic pulse every 10 minutes on the Authie and Seine mudflats, and every 20 minutes on the Medway mudflat), high resolution (0.2 cm) and high accuracy (0.06 cm). The altimeter is composed of a 2 MHz acoustic transducer, which measures the travel time of an acoustic pulse between the mudflat surface and the transducer; which was fixed at a height of ~22 cm above the sediment surface at the beginning of the study. The datasets acquired by the altimeter on the Medway and Seine estuaries have been corrected for salinity and temperature effects based on (i) data from autonomous buoys near the studied sites (Deloffre et al., in press) and (ii) Coppens (1981) speed of sound in water equation. On the Authie, the absence of estuarine network does not permit such corrections. In order to identify seasonal trends in the sedimentary behaviour of each intertidal mudflat, the altimeter was deployed for at least one year at each site: 23/09/02-28/11/04 (Authie), 20/06/03-18/08/05 (Medway), and 25/07/01-04/05/03 (Seine). Annual variations in bed level indicated that the most suitable period for sediment deposition was the spring tide period, and hence additional equipment deployments were carried out during these periods.

Measurements of the near bed current velocities prevailing on the sites were obtained during several spring semi-diurnal tidal cycles under low river flow conditions by the means of a 6 MHz Nortek Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) (Kim *et al.*, 2000). The ADV measurement cell is located at 15 cm from the transmitter, and was set to measure at a height of 7 cm above the sediment-water interface. This instrument acquires 3D current velocities near the bed at a 32 Hz frequency. These high-resolution measurements allow the calculation of turbulent shear stress. The turbulent kinetic energy method (TKE method) is the most suitable to estimate the turbulence generated by tidal currents and wind-induced waves on intertidal mudflats (Voulgaris and Townbridge, 1998; Kim et al., 2000) and was applied here. The backscatter signal recorded by the ADV allowed estimation of the

near-bed suspended solids concentration (SSC) (Kim et al., 2000). The relationship between ADV backscatter and SSC was derived using surface sediment samples on each site to minimize errors induced by varying grain-size (Voulgaris and Meyers, 2004).

2. Sediment analyses

In order to analyse the processes and to compare the evolution of the intertidal mudflats, superficial sediment properties were analysed. Surface sediments and short cores (length:~30 cm, diameter: 10 cm) have been sampled during each field work period (i.e. every two months). The main physical characteristics of the sediment were determined using standard sedimentological proceedings. The water content was measured using a wet-dry weight technique (water content = water weight/dry weight x 100). The grain-size distribution (sand-to-clay fraction) was analysed using a Laser Beckman-Coulter LS 230. Organic matter content of the sediment was quantified by the technique of ignition loss at 525 °C ; and carbonate content was measured using a Bernard calcimeter.

The lithology on the cores was investigated using the SCOPIX X-Ray imagery method developed by the Bordeaux I University (Migeon et al., 1999). This high-resolution instrument permits the observation of mm-thick layers of sediment (Lofi and Weber, 2001).

RESULTS and INTERPRETATION

1. Sediment characteristics

Carbonate contents in surface sediments ranged between 9 and 15% on the Medway mudflat. Much more variability was observed in the Authie and the Seine, with carbonate contents of between 25 to 50 % recorded. The organic matter content of these superficial sediments is similar however at each site, ranging from 9.5% to 19%. In each estuary, there is little temporal variability in grain size characteristics. The main grain-size modes are of : 20 and 40 μ m on the Medway site; of 15, 40 and 90 μ m on the Seine site; of 40 and 90 μ m on the Authie site. Thus the Authie and the Seine sediments are generally coarser than those in the Medway. The main granulometric difference between the sites occurs in the sand fraction: a 200 μ m-fraction over the Seine mudflat (5-15 %), while on the Authie mudflat fine-grained sediment is often associated with a sand fraction of less than 10% (modes: 200 μ m and more rarely 800 μ m). At the contrary on the Medway mudflat, no sand fraction was observed.

The main parameter varying over an annual scale is the water content. While this parameter was quite constant over 1 year monitoring period in the surface samples from the Medway estuary (70-95%) and the Authie bay (65-90%), it varies widely on the Seine mudflat (80-200%). Thus in this last estuary fluid mud occurs during sedimentation periods. Variations of water content in the superficial sediments of the Seine mudflat are due to (i) deposition of fluid mud (water content = 200%) on the mudflat, (ii) dewatering processes due to consolidation and to desiccation during neap tides. Based on laboratory experiments, Deloffre et al. (in press) have estimated the impact of dewatering on the altimeter dataset. Variations of bed elevation induced by dewatering have therefore been removed from raw altimeter dataset on the Seine estuary. The present altimeter dataset takes into account only erosion and sedimentation processes.

2. Sedimentation rhythms and mechanisms

Annual comparison of bed level measurements on the intertidal mudflats studied is presented in figure 2. Mudflats in the Authie and Seine estuaries record a net deposition of 15-18 cm.year⁻¹ during the study whereas the Medway mudflat shows a relatively stable elevation throughout the year. Although net sedimentation rates over an annual timescale are similar in the Authie and Seine estuaries, sedimentation rhythms are different (Fig. 2).

On the Authie mudflat, topographical variations at a lower scale clearly reveal that the sedimentation is controlled by the semi-lunar tidal cycle (Fig. 2, Fig 3A): bed level increases during spring tides, and then decreases or is stabilized during neap tides, when the water level is low on the mudflat or when the mudflat is subaerially exposed. For each spring tide cycle the bed level increases leading to the rather continuous sedimentation on the study area of Authie Bay along the year. The threshold value that discriminates erosion and sedimentation phases correspond to a water level of 110 cm on the mudflat, that corresponds to a tidal range of 5.5 m. This pattern induces a few days lag between the end of deposition and the maximum water level (Fig. 3A and 3B). The sedimentation

rates observed on the mudflat ranges from 0.1 to 0.6 cm per semi diurnal tidal cycle, following that (i) the resuspension of fine particles in the main channel of the bay being more important during spring tides (i.e. at that time current velocities allows the reworking of fine-grained deposits) and (ii) the longer duration of immersion when the supply of fine particles is possible (vs during neap tides). Processes observed at the semi-diurnal scale (Fig. 4A) reveals that particles settle during flood periods, when the bed shear stress is low (~ 0.25 N.m^{-2}), and the SSC near the bed is high (~ 0.4 g.l^{-1}). When fine-grained sediments progressively settle, the SSC decreases. After one hour of immersion, the bulk of the is settled resulting in a 0.6 cm-thick deposit. During the high tide slack water and ebb periods, the SSC and the turbulent shear stress are low, mean values being of respectively 0.05 g.l⁻¹ and 0.3 N.m⁻². During two periods along the survey, turbulent shear stresses reached a value of 1 N.m⁻² due to wind waves events (Fig. 4A). However, no impact on the surface of the mudflat was observed during these two wind events, each lasting 30 minutes. It is noticeable that during the second event, the water was lower on the mudflat and the SSC increased (Fig. 4A). This phenomenon could be linked to an erosion of the upper part of the mudflat, resulting from the combined effect of wind and tidal currents. However, at the station studied, the recently-settled sediment is not influenced by the wind-generated waves: the Authie mudflat surface remained stable during these events. Apart from wind events, all the sedimentary mechanisms recorded are related to the repetition of semi-diurnal cycles during spring tides (Fig. 4A).

On the Seine estuary mudflat the annual sedimentation rate is of 18 cm (Fig. 2), however, in contrast to the Authie mudflat, the main deposition phase occurs during the highest spring tides, i.e. according to the lunar cycle, when the water level is > 150 cm above the bed level at the studied station. During these periods, the turbidity maximum reaches high concentrations (>1.95 g.l⁻¹) and the maximum volume (Le Hir et al., 2001; Lesourd et al., 2001;) in both the main channel (i.e. the navigation channel) and the northern channel; then, the turbidity maximum induces a maximum deposition rate on the mudflat (Deloffre et al., in press). At this time, sedimentation occurs on the mudflat with high sedimentation rates of 0.3 to 0.8 cm per tide observed (Fig. 3B). As on the Authie mudflat, a lag between the maximum of deposition and the maximum of water level is observed (Fig. 3B). During periods of lower water level (< 150 cm water depth on the mudflat), the mudflat

experiences a gradual erosion, with rates ranging between 0.02 and 0.085 cm during a semi-diurnal cycle. Over an annual timescale, the morphological evolution of the Seine mudflat corresponds to a few periods of important sedimentation, 6-10 times per year, with amplitudes of bed elevation between 2 and 8cm, followed by long periods of slow erosion imputable to tidal currents (Fig. 2).

At the semi-diurnal scale, settling of particles occurs during high water slack periods (Fig. 4B). During the flood tide, when the Seine mudflat becomes covered, even outside storm periods, small wind waves occur, inducing a high turbulent shear stress that reaches 1 to $1.5 \text{ N} \text{ m}^{-2}$. It prevents the deposition and the SSC is high in the water column (up to 1 g.l⁻¹). During the early high water slack water, when the turbulent shear stress decreases (~ 0.25 N.m⁻²), the SSC decreases: the fine-grained material settles on the mudflat leading to a 1 cm-thick layer (Fig. 4B). As soon as the material has settled, the SSC becomes low in the water column. During the late slack and ebb periods, the topographic level decreases; this is interpreted as the result of dewatering and erosion of the soft/fluid mud deposit by tidal currents. In the Seine estuary, the duration of high water slack is up to 3 hours during spring tides, with a well-developed double high tide that favours the settlement of fine particles and the dewatering/consolidation processes just after deposition.

When compared to the Seine and Authie mudflats, the Medway mudflat shows reduced topographical variations (Fig. 3C): bed level variations at the annual scale are +/- 1 cm (Fig. 2). This amplitude is consistent with earlier studies that report a low sediment supply in the Medway estuary (Kirby, 1990; Pye and French, 1993). This range of bed level elevational changes is close to the altimeter accuracy, it is very difficult to discuss. However on this mudflat, the SSC is always low ~ 0.1 g.l⁻¹ (Fig. 4C), and the main feature of this estuary is the lack of sediment supply. This low sediment supply, combined with the low impact of wind events, where the bottom shear stresses is always lower than 0.3 N.m⁻² (Fig. 4C), leads to an equilibrium at the annual scale (Fig. 2).

3. Erosion events

Altimeter's measurements at high resolution and high frequency permit to access the impact of wind generated waves on the mudflat through an inspection of the bed level at the tidal scale.

Compared to the continuous slow tidal erosion, the wind-induced reworking of intertidal mudflats occurs in fact as a rapid process.

The Authie and Medway mudflats show no evidence of wind-generated erosion events (Fig. 2; Fig. 4b and Fig. 4c). This pattern on the mudflats is consistent with the sheltered morphology of these estuaries. In contrast, the Seine mudflat experiences strong erosion phases induced by westerly to northwesterly swells and to waves generated by local winds in the Bay of the Seine, with a southerly to westerly dominance induced (Lesourd et al., 2001). These occur on the mudflat about 10 times during a year, especially during the winter (Deloffre et al., in press). On the studied station, the amplitude of the wind-induced erosion is 0.2-2 cm corresponding to wind speed intensities ranging from 12 to 20 m.s⁻¹ (Deloffre et al., in press). However a direct correlation between wind speed and erosion on the mudflat is difficult: the sediment properties (i.e. consolidation state) have to be taken into account. For a same wind event, the erosion is more important on a fluid mud bottom (i.e. during a period of deposition) compared to a consolidated muddy bed (i.e. during tidal erosion periods).

4. Coupling altimeter dataset and lithology analyses

The SCOPIX X-ray images of cores allow the identification of physical structures (i.e. layers and surfaces) and biological structures (i.e. burrows, tracks, shell remains) that make up the deposits. The images of the cores from the studied intertidal mudflats show that biological features, as burrows, are always observed, and shells are also found at the Medway station. From the point of view of physical of features, deposits are made up thin layers on the Seine and Authie mudflats, while no structure appear on the Medway mudflat except from a single superficial layer. Considering only the data of SCOPIX X-ray imagery, an interpretation of the sedimentary facies on the studied intertidal mudflats is difficult: single layers can be interpreted as the result of semi-diurnal, semi-lunar or lunar cycles of deposition. The approach proposed in this study is to link sedimentary cores images in relation to the altimeter dataset. This method permits to propose (i) a scheme of deposition duration for each layer and (ii) to estimate deposition rates for each site, following the number and thickness of layers. In the Authie mudflat, biological activity is important, mainly due to the work in depth of polychaetes (*Nereis*) and of crustaceous (*Corophium*) at the subsurface. However, physical facies are also obvious on this site, as thin layers of fine sediment can be observed (Fig. 3A). It is important to point out that the occurrence of thin sediment layers are consistent with the observed bed-level variations (Fig. 3). On this site where deposition is driven by the semi-lunar cycle, the deposition phases are recorded in the cores, and correspond to cm-thick layers; however, all the semi-lunar cycles are not recorded in the preserved sediment (Fig. 3A). This demonstrates that even in protected settings, the water current velocities are high enough to rework the deposits that correspond to some fortnight cycles and, as a result, gaps occur on the neap-spring recording time.

In the Seine estuary mudflat, freshly deposited sediments (i.e. recent) can clearly be identified on X-ray images from cores sampled a few days after the highest spring tide period (Fig. 3B). They are characterized by erosion surfaces (that result from tidal- or wind-induced phases) at the base of the elementary deposits. Above this erosion surface, low consolidation state and low bulk density (water content on the order of 200%) characterize the fresh deposits. Then, positive X-ray images reveal the fresh deposits by light grey colours (Fig. 3B). In term of layer thickness, the altimeter dataset and the sedimentological variations in the cores are consistent: while the core sampled a thickness of freshly deposited sediment of ~ 2.5 cm-thick, the altimeter dataset indicates a bed level elevation of 2.7 cm (Fig. 3B). This type of analysis however, the lithological analysis of the uppermost part of the cores is not possible at sediment depths exceeding 10 cm, mainly because of the strong mixing by bioturbation and the erosion of a part of the deposits by waves and/or tidal currents (Fig. 2).

No apparent physical structure occurs on the X-ray images of the cored sediments on the Medway mudflat. This is consistent with the monotonous altimeter record that demonstrates the stability of the mudflat all along the year (Fig. 2). However the X-ray image of the core shows that the top centimetre of the sediment is very lighter; it corresponds to a lower consolidated material than the underlying muddy sediment. This thin superficial layer corresponds to the continuously-reworked part of the sediment under the tidal currents (Fig. 3C).

GENERAL DISCUSSION

Sedimentation processes in the tidal mudflats examined in this paper are strongly influenced by sediment supply and of the morphology of the estuary, at various time-scales (Table I). No trend of net erosion or sedimentation occurs at the Medway station while the mudflats examined in the Seine and the Authie estuaries show a similar sedimentation rate at annual scale (15-18 cm.year⁻¹).

In the Medway estuary, Cundy et al. (2005) demonstrated that the sedimentation rates are weak and that processes are reproducible. In this environment, hydrodynamics conditions (i.e. tidal currents and turbulence) are low and then, unable to induce an erosion of the mudflat. At the same time, sedimentation phases are not recorded. On this mudflat, no source of sediment has been identified. These patterns are consistent with the literature indicating the reworking of the fine particles inside the estuary and the low erosion of tidal flat and salt marshes (Burd, 1989, Kirby, 1990; Pye and French, 1993). A similar pattern of sedimentation has been identified in microtidal environments (Andersen, 2001).

The morphology of the mouth of estuaries control the impact of wind-generated waves. In the open lower Seine estuary, these processes induce a rapid erosion (0.2 to 2 cm) of the studied mudflat. Erosion by waves is controlled by the wind direction and intensity, the water level on the mudflat and the sediment characteristics. The erosion on the Seine mudflat along the survey occurs preferentially when the water level on the studied site is low and is more important after a deposition episode of fresh, unconsolidated mud.

The sheltered Authie mudflat shows no evidence of wind-induced erosion: on this mudflat, tidal currents are the only causes for the erosion phases of sediments at the study station.

On the Seine and Authie mudflats, though long-term sedimentation rates are similar, the rhythms of deposition are different (Fig. 2, Table I). In the Authie, a continuous sedimentation occurs according to the semi-lunar cycles. There, a linear relationship can be established between the tidal ranges and the resulting deposit thickness, as deduced from the altimeter data (Fig. 5). On the studied station of the Seine estuary mudflat, no sedimentation occurs during the neap- to medium spring- tide conditions . Thus, sedimentation on this mudflat occurs when a tidal range threshold value of 7.1 m is reached (Deloffre et al., in press and Fig. 5). Thus, a discontinuous sedimentation occurs according to

the lunar cycle, only during the higher spring tides; this pattern leads to a few deposition episodes in a year (less than 10, Fig. 2 and Table I).

The sedimentation on the Authie mudflat corresponds to semi-lunar rhythm of sedimentation that is the typical process on most modern sheltered mudflats. The lower Seine estuary mudflat exhibits a particular pattern of deposition-erosion. This unusual pattern is not due to the altitude of the studied site: (i) the elevation on the Authie mudflat is the same, and (ii) this pattern is recorded on other loci of the Seine slikke, including at lower altitudes (Deloffre et al., in press). The difference between the rhythms of sedimentation on the Authie and Seine mudflats seems to be linked to the sediment availability and to its properties. On the Authie mudflat, the fine particles originate in the reworking of sediment of lower parts of the slikke with the fast infilling of the estuary during the flood tide. During each spring period, the resuspension of the fine material occurs and the mudflat experiences a sedimentation phase at the studied location of the middle slikke. In the Seine estuary, the feeding of the mudflat is linked to the turbidity maximum (Deloffre et al., in press). Because of (i) the suspended particulate matter characteristics and (ii) the hydrodynamic conditions, the Seine estuary turbidity maximum development is the higher during tidal ranges exceeding 7.1 m (Avoine et al., 1981; Le Hir et al., 2001), which is the threshold value for deposition (Fig. 5). The control of the sedimentation by the turbidity maximum also induces annual differences. Sedimentation rates are higher during low river flows, when the turbidity maximum is located in the estuary in the mudflat area (Lesourd et al., 2001; Le Hir et al., 2001), than during low river flows, when the turbidity maximum is expelled outside the estuary to the Bay of the Seine. During a lunar cycle of deposition (Fig. 2), high sedimentation rates are the result of some specific characteristics of the Seine estuary. Due to the high silt content (quartz, calcite) and a low clay mineral content (Lesourd, pers. comm.), the settling velocity of particles in the lower Seine estuary is higher (~ 1 mm.s⁻¹) than in other estuarine settings (Delo and Ockenden, 1992). These high settling velocities combined to the long high tide slack (up to 3 hours) in the Seine estuary lead to the high sedimentation rates observed on the mudflat during the highest spring tides. These parameters induce the settlement of fluid mud that is only observed in this estuary among the three studied settings; thus on this mudflat dewatering processes have to be strongly considered.

The properties of cohesive material play an important role on the deposition (formation of laminae) and the preservation of fine-grained sediments. The sediment of the Medway estuary mudflat, as analysed along the cores, is characterized by only soft grain-size variations. This feature, combined with insignificant sedimentation rates, has for result the absence of physical structures in the cores sampled on this mudflat. Sediment properties such as grain-size, water content and settling velocities play a part in the deposit thickness on intertidal mudflats. As well as the amplitudes of the waves, the depths of wind-induced erosion are related to the cohesion of surface sediments. This leads to the occurrence of erosion phases on the open Seine mudflat where the mud is soft or even fluid (Fig. 3b), while on the sheltered Authie mudflat, the sediment is coarser-grained and less fluid, and only a little erosion by waves is observed (Fig. 4A).

To investigate the lithology of modern intertidal estuarine mudflats with the aim of the interpretation of tidal structures is a hard challenge. This approach based on the coupling of altimeter dataset and X-ray images permits to better understand the record and the preservation of tidalites in the superficial deposits. The comparison permits to show that on the Authie and Seine mudflats, where the deposition is driven by tidal cycles (Fig. 2 and Table I), the sediment deposition occurs as mm-to cmthick layers. However, considering the biological activity and the hydrodynamics (i.e. tidal or wind induced erosion) on these mudflats, expected tidalites are rarely preserved in the cores. However, the comparison between several mudflat settings enhances the plurality of sedimentation tendencies, in particular when the superficial material is considered (Table I). In the uppermost 5 cm of the cores, the age of the sediment of the three studied estuaries range from 3 days to 10 years. In the case of the Seine estuary, the age of the uppermost part of the sediment, in relation to its particular behaviour (i.e. high supply and sedimentation rates but only during the highest spring tides) varies from some days to the month-scale. On the Authie mudflat, where the sedimentation is driven by the fortnightly cycle, the age of the surface sediment (first centimetre) is in the range of 1-10 days scale. In the Medway estuary, Cundy et al. (2005), using radionucleide methods, indicate a mean sedimentation rate of 4 mm.year⁻¹ in the upper 13 cm of the cores: this value is consistent with the single surface lamina and the absence of physical structures in this layer. Finally the age of the topmost 5 cm sediments on these mudflats varies widely from days to more than a year (Table I).

CONCLUSION

Sedimentation and erosion processes over estuarine intertidal mudflats result from a complex combination of fine sediment availability, sediment properties, local morphology, hydrodynamics parameters (tidal cycles, river flows, wind generated waves) and biological activity. These parameters induce the morphological evolution of intertidal mudflats at different encased time-scales.

The main results of this arise from the combination of altimeters measurements at high resolution, high frequency and at the year-scale and collection of sediment cores along the survey. This permitted to better understand the mechanisms from the semi-diurnal to the seasonal scale, but also instantaneous processes such as wind-generated erosion. On the studied mudflats, deposition and erosion processes occur at the semi-diurnal tidal scale, while the sedimentation rhythms are either driven by fortnightly and lunar cycles. The analyses of the rhythms of sedimentation on the three studied sites permit to : (i) confirm that the Authie mudflat is a typical sheltered environment, where the fine-grained deposition occur according to the fortnightly-scale, (ii) consider that the Medway mudflat is a sediment-starved system where the reworking of autochtonous material dominates, (iii) demonstrate that the mudflat in the Seine mouth is characterized by a specific pattern of sedimentation, only during the highest spring tides, as linked to the higher concentrations in the turbidity maximum.

ACKNOLEDGEMENTS

This study was carried out as part of the French interdisciplinary research program Seine-Aval (http://seine-aval.crihan.fr), supported by the following partners: the French State, the Haute-Normandie Region and the other Regions of the Paris basin, the Agence de l'Eau Seine-Normandie, and the industrial firms of the Haute-Normandie. This work has also been supported by the franco-british Rimew Interreg IIIA program (http://info1.scitech.sussex.ac.uk/rimew) and the French national program PNETOX II. Wind speed and direction have been provided by the CEFAS and IFREMER. Authors would also like to express their gratitude to John Taylor (University of Sussex, U.K) for his helpful comments, Joël Saint Paul, Michel Cremer and Olivier Weber (University of Bordeaux, France) for SCOPIX analyses. Michel Simon (University of Rouen) was helpful for fieldworks.

REFERENCES

- Amos, C.L., 1995. Siliciclastic tidal flats, in: Perillo, G.M.E. (ed.). Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Developments in Sedimentology, 53. Amsterdam. Elsevier, pp. 273-306.
- Andersen, T.J., Pejrup, M., 2002. Biological mediation of the settling velocity of bed material eroded from an intertidal mudflat, the Danish Wadden Sea. Estuar. Coast. Shelf S., 54, 737-745.
- Andersen, T.J., 2001. Seasonal variations in erodibility of two temperate, microtidal mudflats. Estuar. Coast. Shelf S., 53, 1-12.
- Anthony, E.J., Dobroniak, 2000. Erosion and recycling of estuary-mouth dunes in a rapidly infilling macrotidal estuary, the Authie, Picardy, northern France, in: Pye, K., Allen, J.R.L. (eds), Coastal and Estuarine Environments. Sedimentology and Geoarchaelogy. Special publication of the Geological Society of London, 175, pp. 109-121.
- Archer, A.W., Kuecher, G.J., Kvale, E.P., 1995. The role of tidal velocity asymmetries in the deposition of silty tidal rhythmites (Carboniferous, estern interior coal basin, USA). J. Sediment. Res., A65, 408-416.
- Avoine, J., Allen, G.P., Nichols, M., Salomon, J.C., Larsonneur, C., 1981. Suspended sediment transport in the Seine estuary, France. Effect of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology. Mar. Geol., 40, 119-137.
- Bassoullet, P., Le Hir, P., Gouleau, D., Robert, S., 2000. Sediment transport over an intertidal mudflat: field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Marennes-Oleron" (France). Cont. Sh. Res., 20, 1635-1653.
- Black, K.S., Paterson, D.M., Cramp, A., 1998. Sedimentary processes in the intertidal zone, The Geological Society, London, 410 pp.
- Burd, F., 1989. Saltmarsh survey of Great Britain, Research and Survey in Nature Conservation, 17, Nature Conservancy Council, Peterborough.
- Christie, M.C., Dyer, K.R., Turner, P., 1999. Sediment flux and bed-level measurements from a macrotidal mudflat. Estuar. Coast. Shelf S., 49, 667-688.
- Choi, K.S., Park, Y.A., 2000. Late Pleistocene silty tidal rhythmites in the macrotidal flat between Youngjong and Youngyou Islands, west coast of Korea. Mar. Geol., 167, 231-241.

- Cundy, A.B., Lafite, R., Taylor, J.A., Hopkinson, L., Deloffre, J., Charman R., Gilpin, M., Spencer, K., Carey, P.J., Heppell, C.M., Ouddane, B., De Wever, S., 2005. Sediment transfer and accumulation in two contrasting saltmarsh/mudflat systems: the Seine estuary (France) and the Medway estuary (UK). Hydrobiologia, accepted.
- Coppens, A.B., 1981. Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters. J. Accoust. Soc. Am., 69, 862-863.
- Dalrymple, R.W., Knight, R.J., Lambiase, J.J., 1978. Bedforms and their hydraulic stability relationships in a tidal environment, Bay of Fundy, Canada. Nature, 275, 100-104.
- Delo, E. A., Ockenden, M. C., 1992. Estuarine muds manual, v. SR 309, HR Wallingford.
- Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., Verney, R., Lesourd, S, Cuvilliez, A., Taylor, J. Interactions between intertidal mudflat and turbidity maximum in macrotidal estuarine context. Mar. Geol., in press.
- Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S., Verney, R., Guézennec, L., 2005. Sedimentary processes on a fluvial estuarine mudflat: the macrotidal Seine example (France). Estuar. Coast. Shelf S., 64, 710-720.
- Dyer, K. R., 1995, The typology of intertidal mudflats; in: Perillo, G.M.E. (ed.). Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Developments in Sedimentology, 53. Amsterdam. Elsevier, pp. 273-306.
- Dyer, K.R., Christie, M.C., Feates, N., Fennessy, M.J., Pejrup, M., Van der Lee, W., 2000a. An investigation into processes influencing the morphodynamics of an intertidal mudflat, The Dollard Estuary, The Netherlands: I. Hydrodynamics and suspended sediments. Estuar. Coast. Shelf S., 50, 607-625.
- Dyer, K. R., Christie, M. C., Wright, E. W., 2000b. The classification of intertidal mudflats. Cont. Shelf Res., 20, 1039-1060.
- Gouleau, D., Jouanneau, J.M., Weber, O., et Sauriau, P.G., 2000. Short- and long-term sedimentation on Montportail–Brouage intertidal mudflat, Marennes–Oléron Bay (France). Cont. Shelf Res., 20, 1513-1530.
- Kvale, E.P., Fraser, G.S., Archer, A.W., Zawistoski, A., Kemp, N., McCough, P., 1994. Evidence of seasonal precipitation in Pennsylvian sediments of the Illinois Basin, Geology, 22, 331-334.

- Kim, S.C., Friedrichs, C.T., Maa, J. P.Y., Wright, L.D., 2000. Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic doppler velocimeter data. J. Hydrol. Eng., 126, p. 399-406.
- Kirby, R., Bleakley, R.J., Weatherup, S.T.C., Raven, P.J., and Donaldson, N.D., 1993. Effect of episodic events on tidal mudflat stability, Armillan Bay, Strangford Lough, Northern Ireland, in: Mehta, A.J. (Ed), Nearshore and Estuarine Marine Cohesive Sediment Transport, Coastal and Estuarine Studies, Vol. 42. Am. Geoph. U., Washington, DC, pp. 378-392.
- Kirby, R., 1990. The sediment budget of the erosional intertidal zone of the Medway Estuary, Kent. Proceedings of the Geologists Association, 101, 63-77.
- Le Hir, P., Ficht, A., Da Silva Jacinto, R., Lesueur, P., Dupont, J.P., Lafite, R., Brenon, I., Thouvenin,B. Cugier, P., 2001. Fine sedimentation transport and accumulations at the mouth of the Seine Estuary (France). Estuaries, 24, 950-963.
- Lofi, J. Weber, O., 2001. SCOPIX digital processing of X-ray images for the enhancement of sedimentary structures in undisturbed core slabs. Geo-Mar. Lett., 20, 182-186.
- Migeon, S., Weber, O., Faugeres, J.-C., Saint-Paul, J., 1999. SCOPIX: A new X-ray imaging system for core analysis. Geo-Mar. Lett.s, 18, 251-255.
- O'Brien, D.J., Whitehouse R.J.S. Cramp, A., 2000. The cyclic development of a macrotidal mudflat on varying timescales. Cont. Shelf Res., 20, 1593-1619.
- Lafite, R., Romaña, L.A., 2001. A man-altered macrotidal estuary: The Seine estuary (France): Introduction to the special issue. Estuaries, 24, 939.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.-C., Auffret, J.-P., Poupinet, N., Laignel, B., 2001. Morphosedimentary evolution of the macrotidal Seine estuary subjected to human impact. Estuaries, 24, (6B), p. 940-949.
- 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. Amsterdam: Elsevier, pp. 17-47.
- Pye, K., French, P.W., 1993. Targets for Coastal Habitat Recreation, A report for English Nature, Cambridge Environmental Research Consultants, Cambridge.
- Stupples, P., 2002. Tidal cycles preserved in late Holocene tidal rhythmites, the Wainway Channel, Romney Marsh, southeast England. Mar. Geol., 110, 355-367.

- Schoellhamer, D.H., 1996. Anthropogenic sediment resuspension mechanisms in a shallow microtidal estuary. Estuar. Coast. Shelf S., 43 (5), 533-548.
- Tessier, B., 1993. Upper intertidal rhythmites in the Mont-Saint-Michel Bay (NW France): perspectives for paleoreconstruction. Mar. Geol., 110, 355-367.
- Tessier, B., Archer, A.W., Lanier, W.P. Feldman, H.R., 1995. Comparison of ancient tidal rhythmites (Carboniferous of Kansas and Indiana, USA) with modern analogues (the bay of Mont-Saint-Michel, France). Special Publications of the International Association of Sedimentologists, 24, pp. 259-271.
- Voulgaris, G., Trowbridge, J. H., 1998, Evaluation of the acoustic doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements. J. Atmos. Ocean. Tech., 15, 272-289.
- Voulgaris, G., Meyers, S. T., 2004. Temporal variability of hydrodynamics; sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek. Cont. Shelf Res., 24, 1659-1683.
- West, M. S., West, J. R., 1991, Spatial et temporal variations in intertidal zone properties in the Severn estuary, UK, in: Elliott, M., Ducrotoy, J.P. (eds), Estuaries et Coasts, Alson et Alson, Fredensborg, pp. 25-30.

Caption (5 figures and 1 table)

Figure 1 : Location of the areas studied (modified from Cundy et al., 2005)

- (A) Medway estuary (Kent, UK)
- (B) Authie estuary (Pas-de-Calais, France)
- (C) Seine estuary, (Normandy, France)

Figure 2 : Annual bed-elevation on the intertidal mudflats of the studied estuaries

Figure 3 : Sedimentation rhythms: comparison between monthly bed level evolution and recorded lithology

A: Authie; B: Seine and C: Medway

E.S.: Erosion Surface

Figure 4: Semi-diurnal mechanisms; sedimentary and hydrodynamics condition during similar spring tide conditions. A: Authie (07/05/03); B: Seine (10/05/03) and C: Medway (10/04/05) Theses trends have been observed during several semi-diurnal surveys on each mudflat.

Figure 5 : Relationship between tidal range and maximal deposit thickness on the Authie and and the Seine mudflats

LRF : Low River flow HRF : High River Flow

Table I : Comparison of the main characteristics of the mudflats studiedSD : semi-diurnal; FC: fortnightly cycle; LC: lunar cycle; TM: turbidity maximum


Figure 1



Figure 2



Figure 3







Figure 5

	SEINE	AUTHIE	MEDWAY
Morphology at the Mouth	Opened estuary	Protected Bay	Opened estuary
Sediment Supply	Turbidity Maximum	Resuspended sediment inside the estuary	Low : Recycling in the estuary
Forcing parameter(s)	Strongest Spring tides (TM development) - Wind (>15m.s-1 Westerlies)	Tidal Cycles	-
Sedimentation rates at semi-diurnal scale (cm)	0.3 to 0.8	0.1 to 0.6	-
Main sedimentation cycles (deposit sequence)	Lunar	Fortnightly	None
Max. sedimentation during one deposit episod (cm)	8	5	-
Number of sedimentation episod/year	7 to 10	15 to 22	-
Annual sedimentation rates (cm)	18	15	0
Typical Facies and Estimated duration based on bed-level evolution	SD SD SD SD SD SD SD SD SD SD	FC FC FC FC FC FC FC FC FC FC FC FC FC F	Low consolidated sediment Consolidated sediment. (0.4 cm.year ⁻¹ ") 1cm * Based on radionucleides measurements proposed by Cundy et al. 2005

CHAPITRE V:

SYNTHESE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE



- 1. Synthèse des résultats acquis
 - 2. Perspectives de recherche

1. SYNTHESE DES RESULTATS ACQUIS

De nombreux travaux récents visent à la compréhension des mécanismes contrôlant le transport du sédiment cohésif (e.g. Dyer, 1998 ; Black et al., 1998 ; Whitehouse et al., 2000a ; Winterwerp et Van Kesteren , 2004). De même, les études ayant pour but de comprendre le fonctionnement des vasières intertidales sont abondantes et variées dans leurs objectifs. Deux stratégies ont été utilisées pour le suivi du fonctionnement hydrosédimentaire des vasières intertidales à partir d'instruments de mesure in situ. D'une part, les mesures à court terme et haute résolution s'attachent à la compréhension des processus sédimentaires à l'échelle tidale, du cycle de marée semi-diurne au cycle semi-lunaire (e.g. Pejrup, 1988b ; West and West, 1991 ; Dyer et al., 2000 ; Lawler, 2005). D'autre part, les mesures à long terme et basse fréquence ont permis d'estimer les masses de particules fines stockées sur les vasières intertidales (e.g. Pejrup, 1988b ; O'Brien et al., 2000 ; Lesourd, 2000). Malgré quelques exceptions (Bassoullet et al., 2000 ; Couperthwaite et al., 1998; O'Brien et al., 2000, Pejrup et Andersen, 2005), peu de travaux s'attachent à la compréhension des processus d'érosion et de dépôt en relation avec les contraintes hydrodynamiques (débit, vent, marée, batillage) et sédimentaires (sources de matériel) à long terme et haute fréquence. Pourtant ce type d'enregistrement est essentiel pour le calibrage et/ou la validation des modèles numériques de transport sédimentaire.

La stratégie d'étude, mise en place dans le présent travail, a permis de mieux comprendre, à partir de chroniques d'altimétrie à haute résolution, haute fréquence et long terme, le fonctionnement hydrosédimentaire des vasières intertidales estuariennes à différentes échelles de temps emboîtées. Cet ensemble original de données, complété par des mesures ponctuelles de courantométrie haute fréquence et des prélèvements de sédiment et de carottes sédimentaires, obtenus sur différents environnements macrotidaux, fournit une quantité d'informations permettant de caractériser finement le fonctionnement sédimentaire des vasières intertidales estuariennes et de quantifier les transferts sédimentaires.

1.1. Les mécanismes sédimentaires à l'échelle semi-diurne

Les mécanismes élementaires de sédimentation et d'érosion sur les vasières intertidales se produisent à l'échelle du cycle semi-diurne. L'obtention de mesures fiables dans de faibles tranches d'eau est complexe. Les instrumentations acoustiques utilisées dans cette étude ne permettent pas des mesures sous une faible tranche d'eau, inférieure à 20 cm. Toutefois, les informations obtenues dans cette étude permettent de comprendre les mécanismes de dépôt et d'érosion sur les vasières intertidales étudiées. L'expérience acquise au cours des suivis annuels a permis de choisir une stratégie d'étude adaptée à ce type de suivi.

Dans les estuaires macrotidaux, les périodes de sédimentation sont contrôlées par l'apport de sédiment fin. Les vasières intertidales correspondent plutôt à des zones en érosion ou stables, les périodes de sédimentation se produisant lorsque l'apport en sédiment est suffisant, le rythme de ces apports variant alors

en fonction des sites. Les sites de l'Authie et de la Seine présentent des taux de sédimentation similaires, respectivement 15 et 18 cm.an⁻¹. Toutefois, les rythmes de dépôts sont différents sur ces deux vasières. Sur l'estuaire de l'Authie, le dépôt est continu et se fait au cours de chaque cycle lunaire, son épaisseur est fonction de l'amplitude de marée (Deloffre et al., soumis). Sur l'estuaire de Seine, la sédimentation est discontinue et se fait suivant le cycle lunaire de plus fortes vives-eaux. La seule exception à ce constat est l'occurrence concomitante d'une période de sédimentation et d'une période de forte agitation (vent, batillage) conduisant à l'absence de sédimentation. D'autres paramètres tels que les conditions hydrodynamiques, ou les propriétés du sédiment déposé influencent ces processus de dépôt-érosion.

Le recouvrement et le découvrement des zones intertidales, dus à la marée, induisent systématiquement un remaniement du sédiment superficiel, de 1 à 5 mm quel que soit le site d'étude. Ce phénomène important est à considérer pour toutes les études s'intéressant aux processus à l'interface eausédiment. Cette étude à l'échelle du cycle semi-diurne a permis de s'intéresser aux mécanismes au niveau de cette interface. D'un point de vue sédimentaire, ils ont permis de montrer qu'indépendamment du degré de cohésion du sédiment et de l'agitation, la surface des vasières intertidales est mobile à l'échelle du cycle de marée, ce processus concernant des épaisseurs d'ordre de grandeur millimétrique. En terme de dynamique sédimentaire ces variations sont faibles mais elles peuvent être fondamentales pour les processus chimiques et bio-géochimiques liés à la diagenèse précoce ou impliquant la qualité de l'eau interstitielle (Bally et al., 2004).

Les apports de sédiment sont extrêmement variables à l'échelle de l'année en fonction des sites étudiés. Dans la partie amont des estuaires, l'apport de sédiment est assuré par les crues. A cette période, les vasières de l'estuaire fluvial sont submergées constamment sous une tranche d'eau importante, ce qui limite les érosions liées aux évènements de haute énergie et aux phénomènes de recouvrement/découvrement. De plus, en période de crue, l'onde de marée devient symétrique, la décantation des particules fines est favorisée par une durée du jusant plus longue. Dans l'estuaire fluvial, les mécanismes à l'échelle du cycle semi-diurne favorisent la décantation des MES liées aux apports de crue. En période d'étiage, l'asymétrie de l'onde de marée et les périodes de recouvrement/découvrement des vasières, favorisent l'érosion par la marée et les évènements de haute énergie, tels que le batillage et le clapot.

A proximité de l'embouchure des estuaires macrotidaux, les relations entre les apports de sédiments et l'hydrodynamisme ont été synthétisées (Fig. IV-7). Ces processus contrôlent le fonctionnement des vasières intertidales à l'échelle semi-diurne. Toutefois, d'autres mécanismes sont responsables de l'amplitude du dépôt et du degré de cohésion des particules fines sédimentées, mis en évidence par la comparaison des mécanismes sur différentes vasières. Sur la vasière de l'Authie, les dépôts se produisent au cours du début de la période de flot. Sur l'estuaire de Seine, les dépôts se produisent principalement en début de période d'étale de pleine mer, en raison du clapot quasi systématiquement présent sur cette vasière au cours des périodes de flot. Au moment de l'étale, les MES qui possèdent une vitesse de chute importante en

Seine (Fig. I-18), décantent rapidement sous la forme d'une vase fluide. En raison de la durée importante de l'étale dans cet estuaire (2-3 heures), le tassement de la crème de vase se met en place dès la fin du dépôt à pleine mer. Ceci permet de conserver le dépôt sur la vasière, excepté si une période de vent important se produit au moment du cycle semi-diurne (Fig. III-3). Sur l'estuaire de l'Authie, les dépôts possèdent une granulométrie et une teneur en eau (degré de consolidation) différente comparativement à l'estuaire de Seine, ce qui permet une résistance des dépôts frais de cette vasière à l'érosion par les vagues d'agitation, qui par ailleurs restent limitées sur cette vasière.

1.2. Les mécanismes de conservation des séquences de dépôt

1.2.1. Les forçages des vasières intertidales

Les bilans sédimentaires obtenus à partir des données annuelles montrent que le rôle des vasières intertidales à l'échelle d'un estuaire doit être pris en compte, y compris dans les cas où les zones de dépôts sont restreintes à cause des aménagements : les vasières intertidales participent aux transferts sédimentaires des sédiments fins à l'échelle d'un système, de l'estuaire fluvial à l'estuaire marin. En milieu macrotidal, la dynamique de marée gouverne en grande partie le fonctionnement des vasières intertidales, qu'il s'agisse des mécanismes de sédimentation (vasière Nord de Seine, vasière de l'Authie) ou d'érosion (vasière de Oissel).

L'amplitude de la marée est alors une donnée fondamentale qui modifie les mécanismes sédimentaires, soit en dépôt, soit en érosion (vasières de Seine et de l'Authie). Sur les estuaires étudiés, à l'exception des évènements de haute énergie (Verney et al., 2005a), les mécanismes de sédimentation ne sont pas liés à la courantologie sur la vasière, où la turbulence est suffisamment faible pour permettre le dépôt. Les périodes et les amplitudes de la sédimentation sont liées essentiellement à une modification des apports de particules fines à la vasière depuis la colonne d'eau. A l'embouchure, le dépôt sur les vasières intertidales dépend de l'amplitude de la marée qui modifie l'hydrodynamisme au sein du chenal central de l'estuaire, entraînant une remise en suspension des particules fines au cours des périodes de vives-eaux (Authie) ou des plus fortes vives-eaux (Seine). Ce mécanisme induit un déphasage entre le maximum de hauteur d'eau et le maximum de dépôt, phénomène déjà décrit par différents auteurs (van Straaten et Kuenen, 1958; Potsma, 1961 ; Groen ; 1967, Pejrup 1988a ; Christie et al., 1999 ; Pritchard et Hogg, 2003). Dans la partie fluviale des estuaires macrotidaux au débit solide fluvial important, la sédimentation est liée aux cycles hydrologiques annuels (vasière de Oissel). Dans cette zone de l'estuaire, le forçage principal est également lié à la source sédimentaire : en période de crue la vasière s'engraisse, alors qu'elle est érodée en période d'étiage. De manière simplifiée, pour l'ensemble des vasières étudiées, il existe des valeurs seuils en terme d'hydrodynamisme et de source sédimentaire qui différencient les périodes de sédimentation et d'érosion (Fig. IV-7). La balance entre les deux types de forçages permet de prévoir les périodes de dépôt. Le dépôt, qu'il soit contrôlé par la marée (vasières de Seine et de l'Authie) ou par les débits fluviaux (vasières de Oissel), présente des taux de sédimentation correspondant à des valeurs comprises entre de 1 à 10 cm pour un seul épisode de dépôt dont la durée est comprise entre 3 jours et 3 mois. Plus spécifiquement sur l'estuaire de Seine, l'étude des principales zones d'extension des vases le long de l'estuaire (Oissel, Le Trait, Petiville,

Vasière Nord, Pennedepie) montre bien qu'elles fonctionnent comme des zones de stockage temporaires des sédiments fins, à des échelles de temps variables, qui sont ensuite transféré progressivement soit vers le bouchon vaseux, soit vers la zone marine de l'estuaire. Ce stockage temporaire a des conséquences en terme chimique et biologique, soulignant en outre le rôle des vasières en terme de stockage temporaire des contaminants.

L'érosion des vasières intertidales étudiées s'effectue suivant deux modes différents. D'une part, l'érosion liée aux cyclicités de marée s'effectue progressivement sur les vasières intertidales, avec de faibles taux d'érosion (> 0,1 mm en moyenne par cycle semi-diurne). D'autre part, les évènements de haute énergie : houle ou batillage entraînent des érosions brusques et plus importantes (0,2 à 2 cm par épisode). Ces deux modes d'érosion, se produisent préférentiellement lorsque la hauteur d'eau sur la vasière est faible, en raison de l'augmentation des vitesses de courant de marée à ces périodes (début de flot et fin de jusant) et de la turbulence au fond plus importante lorsque la tranche d'eau est faible. Durant cette période, l'impact de la houle et du clapot peut être prépondérant.

Finalement, la conservation des dépôts sur les vasières intertidales au sein des estuaires macrotidaux dépend donc des apports sédimentaires, de leurs qualités intrinsèques et des mécanismes hydrosédimentaires qui permettent leur conservation. Enfin, les études poursuivies à long terme (dépassant l'échelle de l'année) ont montré que les mécanismes décrits sont reproductibles. Ce constat a permis :

- de mettre en place des schémas conceptuels de fonctionnement des sites d'études et donc de prévoir les périodes de sédimentation sur les différents sites (Deloffre et al., 2005a ; 2005b),
- de valider le fonctionnement de la vasière intertidale d'embouchure de l'estuaire de Seine par le bais d'une modélisation semi-empirique basée sur les données acquises au niveau du point de mesure (Fig. III-9),
- de disposer d'une base de données de terrain permettant de valider et/ou calibrer les modèles numériques de transport sédimentaire à l'échelle de l'estuaire (Waeles et al., 2005),
- de fournir des données sédimentaires permettant de mieux comprendre le fonctionnement chimique et biologique des vasières intertidales (Bally et al., 2004 ; Leloup et al., 2005 ; Touron et al., 2005).

1.2.2. Les rythmes de dépôt

Les travaux sur la vasière amont de l'estuaire de Seine (vasière de Oissel) et sur la vasière aval d'embouchure (vasière Nord) ont permis de décrire et d'évaluer le rôle respectif des agents hydrodynamiques et de la source sédimentaire. En outre, dans cet estuaire macrotidal anthropisé, les vasières intertidales étudiées ont montré que les périodes de stabilité sont rares, même si à l'échelle annuelle une certaine stabilité existe. Des schémas de fonctionnement conceptuels ont été proposés pour ces deux vasières (Deloffre et al., 2005a et 2005b). A l'échelle annuelle, l'amplitude des variations topographiques est de 10-15 cm, quelque soit la vasière, les différents paramètres de contrôle sont identifiés :

• les sources importantes de sédiments fins, qu'il s'agisse des stocks frais liés aux apports solides des crues à l'amont ou des stocks « tampon » du bouchon vaseux à l'aval.

• la morphologie de l'estuaire et des aménagements restreignent les zones favorables de piégeage du sédiment fin. Dans sa partie amont, moins canalisée, zone des îles et des bras morts, des zones préférentielles d'accumulation existent. Dans le chenal central de navigation, des sables, des cailloutis et des argiles raides constituent le plafond du chenal et les vases ne sont observées qu'en situation de dépôt transitoire (Lesourd, 2000).

• les processus hydrologiques et hydrodynamiques jouent également, en raison de leur variabilité dans le temps, un rôle sur la dynamique des vasières intertidales. Le marnage est extrêmement variable entre les sites amont et aval (2,5-8 m). Les variations de la vitesse des courants sur les vasières intertidales peuvent entraîner, notamment en période de recouvrement et de découvrement, le passage d'un comportement de stabilité à un comportement érosif. Les variations de courants dans le chenal central entraînent un développement du bouchon vaseux à l'aval plus important en période de vive-eau. Les débits fluviaux liquide et solide sont extrêmement variables à l'échelle annuelle (100-2 200 m³.s⁻¹), ce qui modifie les apports sédimentaires. Ponctuellement, les évènements de houle, de tempête dans l'estuaire marin, de batillage dans l'estuaire fluvial, peuvent entraîner une augmentation importante de la turbulence au fond et conduit à une érosion des vasières.

• Le degré de consolidation des sédiments étudiés (estimé par la teneur en eau) varient, en particulier en fonction de la granulométrie des sédiments, de la qualité du matériel et des taux de sédimentation. Dans l'estuaire fluvial, les dépôts de crue correspondent à une vase fluide s'accumulant rapidement. Dans l'estuaire aval, les dépôts sont importants, de 2 à 8 cm pour une séquence, en relation avec les apports du bouchon vaseux sous la forme de vase fluide qui se tasse progressivement. Par ailleurs, de longues périodes sans dépôt sont enregistrées : période d'étiage dans l'estuaire amont et périodes d'amplitude de marée inférieure au seuil de marnage de 7,1 m à l'embouchure. Elles permettent une augmentation du degré de cohésion du sédiment par le mécanisme de tassement sous l'effet de son poids propre. La consolidation est amplifiée par le phénomène d'émersion qui augmente la contrainte effective verticale sur le sédiment. D'autre part, l'émersion peut induire une dessiccation du sédiment, et favorise le développement du microphytobenthos tendant à la stabilisation du sédiment (voiles de diatomées), ces deux processus étant favorisés en période estivale.

Les résultats obtenus valident la stratégie d'étude appliquée à la qualification des processus sédimentaires et à la quantification des taux de particules sédimentées/érodées par des mesures à la fois : sur des pas de temps courts (le court terme) et avec une haute résolution, et sur des échelles de temps de suivi instrumenté atteignant une année au minimum (le long terme). Les chroniques annuelles, basées sur un cycle hydrologique du fleuve Seine sont apparues reproductibles et ont pu être modélisées.

Les données recueillies associées aux connaissances antérieures (Guézennec , 1999 ; Lesourd, 2000 ; Garnaud, 2003) permettent d'établir un schéma synthétique du fonctionnement des vasières intertidales dans

les parties fluviales et marines de l'estuaire de Seine, en apportant des éléments de quantification des flux de particules fines. Cette synthèse des connaissances différencie deux comportements suivant les deux phases principales, de durée très différente, du cycle hydrologique : crue et étiage.



Figure V-1 : Schéma synthétique des connaissances actuelles sur le fonctionnement des vasières de l'estuaire de Seine (amont-aval) en distinguant les conditions de crue et d'étiage.

La période de crue sur la vasière de Oissel, étudiée comme représentative de l'ensemble des zones de dépôt fin de l'estuaire amont de l'estuaire de Seine, correspond à une période de sédimentation, qui est engendrée par l'inondation continue de la vasière : la vasière est continuellement immergée et l'augmentation des débits solides apporte des particules fines depuis le Bassin Parisien au cours de la crue (80 % de l'apport annuel en MES).

La période de crue, sur la vasière aval, correspond plutôt à une période d'érosion. Les phénomènes sédimentaires sur la vasière sont fortement liés au bouchon vaseux. Cette période correspond à une période où celui-ci est localisé plus en aval de l'estuaire (vers l'embouchure), voire expulsé vers les petits fonds de la baie de Seine au cours des plus fortes crues. Pour cette raison, la sédimentation sur la vasière d'embouchure est alors plus restreinte, voire nulle. De surcroît dans notre région tempérée, la période des crues de fin d'hiver est celle durant laquelle le passage de dépressions est responsable de vents forts des secteurs W-NW induisant des houles significatives sur la baie de Seine et des clapots sur le plan d'eau compris entre

l'embouchure et la vasière. Lors de ces périodes de vent, l'agitation contrarie la sédimentation et entraîne l'érosion de la surface de la vasière.

En période d'étiage, sur la vasière amont de l'estuaire de Seine, les dépôts de la période de crue sont progressivement remaniés et remis en suspension. Le relargage des particules fines est surtout réalisé au cours des périodes de vives-eaux, suivant en cela les cycles semi-lunaires. Au cours de cette période, la vasière amont devient vraiment intertidale. L'érosion de la vasière est enregistrée lors des périodes de montant (flot) et de baissant (jusant). Dans cette partie de l'estuaire fluvial, l'asymétrie de l'onde de marée est importante, l'érosion est favorisée au cours de la période de flot dominant. La faible tranche d'eau recouvre la banquette latérale plate que représente la vasière favorise l'érosion par le batillage des péniches, lors des faibles tranches d'eau.

Sur la vasière d'embouchure, après la fin des crues, l'étiage est une période où la tendance générale est à la sédimentation, hors des périodes d'agitation. Le bouchon vaseux se reconstitue progressivement, nourri par les remises en suspension des vases fraîchement déposées dans les petits fonds de l'embouchure et l'entraînement d'une partie des particules fines vers l'amont par « pompage tidal » et par l'apport des sédiments remaniés de l'estuaire fluvial. Le bouchon vaseux se situe alors dans l'estuaire interne et favorise le dépôt de vases molles dans les chenaux transverses et à la surface de la slikke de la vasière Nord.

Une synthèse schématique du fonctionnement des vasières intertidales dans les estuaires possédant un bouchon vaseux important est proposée (Fig. V-2). Elle prend en compte aussi les travaux antérieurs (Guézennec, 1999 ; Lesourd, 2000 ; Garnaud, 2003). Il est alors possible de proposer un découpage de l'estuaire suivant les forçages de la sédimentation et de l'érosion sur l'ensemble des vasières, intertidales et subtidales.

	ZONE EXTERNE	ZONE DU BOUCHON VASEUX	ZONE FLUVIALE
Paramètre forcant	Bouchon vaseux	Bouchon vaseux	Apport fluvial
de la sédimentation	(en crue)	(en étiage)	(en crue)
Paramètre forcant de l'érosion	Vent	Vent et marée	Marée et Batillage
Unité temporelle de sédimentation	Cycle annuel et vent	Cycle de marée lunaire	Cycle annuel

Figure V-2 : Schéma de synthèse du fonctionnement des vasières intertidales à l'échelle de l'estuaire de Seine.

1.3. Enregistrement annuel des séquences de dépôt

Au sein des estuaires macrotidaux les cycles de dépôt sont bien marqués. Parallèlement, l'interprétation des séquences de dépôt dans les carottes sédimentaires est un travail complexe. Les principales raisons de cette complexité est la troncature marquée de ces dépôts par l'érosion liée à la marée, aux vagues de vent ou au batillage. La bioturbation, importante sur les vasières intertidales (notamment les

tubes de vers) est un autre processus perturbant les structures physiques liées aux cyclicités de dépôts de marée (estuaire de l'Authie). Enfin, dans une moindre mesure, le matériel qui sédimente au niveau des vasières intertidales est parfois peu différencié, en terme de teneur en eau ou de granulométrie, les lamines sont alors difficilement identifiables.

Le couplage des mesures altimétriques et de l'analyse de la lithologie au sein des carottes sédimentaires, acquis par la technique SCOPIX, ont permis de mieux comprendre les modes d'enregistrement et la conservation des dépôts sédimentaires sur les vasières intertidales en domaine semiouvert. Ce couplage a tout d'abord permis de recaler les carottes en fonction des variations topographiques, ce recalage étant cohérent avec la lithologie dans les carottes (Deloffre et al., 2005a). En l'absence de mesures altimétriques, ce recalage des carottes prélevées sur les vasières intertidales est difficile. Sur la vasière de Oissel, ce recalage a permis de mettre en évidence l'enregistrement des dépôts de crue et leur décapage par la marée ou le batillage au cours des périodes d'étiage (Deloffre et al., 2005a).

Les séquences de dépôt dans la partie aval des estuaires macrotidaux sont contrôlées par la marée. Ce travail a démontré que certains estuaires macrotidaux ne présentent pas de dépôt en raison d'une très faible disponibilité des sources de sédiments fins (estuaire du Medway). Dans cet estuaire, les carottes sédimentaires ne présentent pas de structures physiques, à l'exception du premier centimètre qui est remanié au cours du cycle semi-diurne à l'échelle annuelle (Deloffre et al., soumis).

D'autre part, ce couplage a permis de relier les rythmes de sédimentation mesurés par l'altimètre aux séquences de dépôt observées sur les carottes sédimentaires. Ce travail est complexe au sein des vasières intertidales (Balouin, 1998). La mise en place de ces comparaisons permet d'estimer les taux de sédimentation et la conservation des dépôts au sein des vasières intertidales. Les lamines observées au sein des carottes sédimentaires sont cohérentes avec les rythmes de dépôt semi-diurne. Les séquences de dépôt semi-lunaire (baie d'Authie) ou lunaire (estuaire de Seine) sont distinguées clairement. Toutefois, il est apparu que tous les enregistrements sont perturbés et tronqués, y compris sur la baie protégée de l'Authie, où certains dépôts peu épais ne sont pas conservés (Deloffre et al., soumis).

1.4. Applications aux processus chimiques et biologiques

1.4.1. Cas de profils géochimiques

Dans le cadre du programme multidisciplinaire Seine-Aval 2, l'action DYVA a pour objectif l'étude du rôle des vasières intertidales, lieu de stockage et de relargage des contaminants de l'environnement, ayant une affinité avec les particules fines. L'un des objectifs majeurs de ce travail multidisciplinaire est la modélisation du rôle de la diagenèse précoce sur les vasières intertidales. L'UMR CNRS 6143 M2C a été en charge du volet morphologique, sédimentaire et hydrodynamique des vasières intertidales. La stratégie d'étude a été choisie afin d'être adaptée aux études pluridisciplinaires.

L'étude couplée des variations topographiques de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine, d'une part, et de la chimie de l'eau interstitielle du sédiment d'autre part, a permis d'évaluer le relargage de nutriments. L'eau interstitielle a été prélevée *in-situ* par la technique des dialyseurs (Hesslein, 1976 ; Bally et al., 2004 ; Bally et al., 2005). Les analyses chimiques permettant de mesurer la concentration en NH_4^+ , PO_4^{3-} , carbone organique total, carbone organique particulaire, et Fe et Mn ont alors été menées en laboratoire suivant des procédures standard (Bally et al., 2004). Cette technique permet alors d'obtenir des profils de concentration pour ces éléments suivant l'espacement des compartiments des dialyseurs (0,5 cm).

L'exemple des profils ammonium est présenté sur la figure V-3, soit bruts (A) soit corrigés du décalage de la topographie entre les campagnes de prélèvements (B). Les recalages des profils de nutriments grâce aux données altimétriques mettent en évidence une saisonnalité des flux de nutriments et de matière organique (Bally et al., 2004). En effet, alors que les profils bruts ne semblent pas présenter de tendance claire (Fig. V-3A), les profils recalés par les données altimétriques (Fig.V-3B) permettent de dégager une saisonnalité avec un profil de type « été automne » et un profil de type « hiver-printemps ». Ainsi, cette variation saisonnière des flux de nutriments n'est pas liée à des processus diagénétiques ou à l'activité biologique, mais aux processus sédimentaires sur la vasière et aux processus hydrodynamiques.



Figure V-3 : Evolution de la concentration en ammonium dans la colonne d'eau et le sédiment de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine (Bally et al., 2004, modifié).

 (A) Profils non recalées,
 (B) Profils recalés en fonction des données altimétrique. (les variations topographiques entre les campagnes sont indiqués entre parenthèses)

Le couplage de ces données a permis d'affiner les calculs de flux de nutriments, la mise en place d'un modèle conceptuel de la dégradation de la matière organique et les relations entre le recyclage de la matière organique et les variations saisonnières de nutriments. Les processus physiques apparaissent donc comme le facteur déterminant principal du cycle de la matière organique au sein des 10 premiers centimètres de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine. Ce type de résultats n'est obtenu que grâce aux mesures haute fréquence et long terme de la topographie.

1.4.2. Cas de profils de contamination métallique

Des carottes courtes (30 cm) ont été réalisées sur la vasière de Oissel, la quantification des contaminants particulaires organiques a été effectuée. Les résultats obtenus montrent clairement deux couches de contamination distinctes (Clarisse, 2001). En surface, la concentration en cadmium est relativement faible, les couches sédimentaires à la base de la carotte (variant entre 12 et 18 cm) montrent des concentrations élevées. Le recalage des profils grâce aux données altimétriques (variations d'altitudes de la surface de la vasière entre les différentes campagnes de terrain) permet de mettre en évidence que la profondeur de cette couche est constante dans le temps, elle se situe à une profondeur de l'ordre de 17 cm par rapport à la référence du premier prélèvement.



Figure V-4 : Profils de cadmium particulaire en fonction de la profondeur sur la vasière de Oissel (Clarisse, 2001 modifié).
(A) profils non recalés (données brutes),
(B) profils recalés en fonction des variations topographiques.

Les données de topographie ont montré que cette vasière est quasiment stable à l'échelle de l'année entre la sédimentation en période de crue et l'érosion en période d'étiage, d'une amplitude de l'ordre de 10 cm (cf. chapitre II). Suivant le fonctionnement sédimentaire de cette vasière, les sédiments localisés à une profondeur de 15 cm correspondent à des sédiments anciens, alors que les sédiments les moins contaminés (en surface) correspondent aux sédiments déposés au cours de la crue annuelle (Deloffre et al., 2005a). Ainsi, la couche de surface correspond aux dépôts au cours de la crue 2000-2001 pour les deux premiers profils, alors que le sédiment de surface correspond au dépôt de la crue 2001-2002. Notons que le sédiment de surface de ce dernier prélèvement montre des niveaux de contamination en cadmium légèrement plus élevés comparativement au deux premiers prélèvements.

Ces données confirment la tendance à la réduction des apports en cadmium au niveau de l'estuaire, les taux de contamination des sédiments anciens étant plus élevés ($10 \ \mu g.g^{-1}$) que les sédiments déposés au cours des crues 2000-2001 et 2002-2003 (respectivement, 2 et 3 $\mu g.g^{-1}$).

1.4.3. Cas de profils d'indicateurs fécaux

Les travaux sur les vasières intertidales de l'estuaire de Seine se sont également intéressés à la contamination fécale. Trois sites de l'estuaire de Seine ont été suivis : la vasière amont de Oissel, la vasière d'embouchure et sur les zones subtidales envasées de la baie de Seine (Touron et al., 2005). Sur ces sites, des carottes sédimentaires (de 20 cm) ont été prélevées à différentes périodes de l'année. Suivant des analyses standard de microbiologie, adaptées aux environnements étudiés, le dénombrement des bactéries indicatrices de la contamination fécale de l'environnement : coliformes totaux, coliformes thermo-tolérants, et *Enterococci* a été effectué avec un pas de 2 cm sur une carotte sédimentaire de 20 cm (Touron et al., 2005). Le site le plus contaminé en bactéries fécales est le site amont de la vasière de Oissel. En ce site, la contamination fécale sur la vasière intertidale de l'estuaire fluvial est fortement associée aux processus sédimentaires qui s'y produisent (Touron et al., 2005). La figure V-5 présente le dénombrement des indicateurs de contamination fécale en période de fin de crue (Mai 2003).



Figure V-5: Distribution verticale des indicateurs fécaux sur la vasière de Oissel, en Mai 2005. CFU : Unité de coliformes (Touron et al., 2005)

Les apports liés à la crue, présentent des valeurs de coliformes fécaux plus importants dans le sédiment déposé comparativement au sédiment ancien. L'accumulation des bactéries fécales est importante au cours de la période de crue, période correspondant à une accumulation de sédiments sur la vasière intertidale de Oissel. En période d'étiage, la microflore bactérienne est relarguée progressivement, pour finalement atteindre des niveaux similaires à ceux correspondant aux sédiments anciens : la dynamique des contaminants biologiques est similaire à celle des processus sédimentaires qui contrôlent cette vasière intertidale. Concernant le site de la vasière d'embouchure, les relations entre le dénombrement des bactéries fécales et les processus sédimentaires sont plus complexes, alors que les connaissances actuelles du fonctionnement sédimentaire des zones d'envasement subtidales sont insuffisantes pour permettre d'établir des relations avec les niveaux de contamination fécale (Touron et al., 2005).

Les trois exemples présentés montrent l'intérêt de l'utilisation des mesures altimétriques à haute fréquence et long terme dans le cadre d'études pluridisciplinaires. Toutes les données issues de profils verticaux (carottes sédimentaires, profils dialyseurs) peuvent être recalées en fonction des variations topographiques de la surface de la vasière. Ce type de recalage permet alors de prendre en compte les apports de sédiments frais (apports de la crue dans cet exemple) ou les processus d'érosion. Ce type de données permet d'interpréter de façon appropriée les résultats issus de données chimiques ou biologiques sur les profils verticaux. Les données altimétriques permettent de donner un âge aux différentes séquences de dépôt, donnée essentielle dans le cadre des études pluridisciplinaires.

2. PERSPECTIVES DE RECHERCHE

2.1. Comportement à l'interface eau-sédiment

D'un point de vue méthodologique, les études entreprises sur les informations acoustiques données par l'altimètre Altus (réponse des différentes voies) permettent de souligner les capacités de l'appareil à mesurer des variations d'ordre millimétrique du niveau du sédiment superficiel (cf. Chapitre I). Le comportement de la vase fluide à l'interface eau-sédiment est observé, soit en terme de tassement (Fig. I-44) ou de fluidification (Fig. I-46). La surface des vasières intertidales, quel que soit le site d'étude, est remaniée sur quelques millimètres au cours de chaque cycle de marée semi-diurne. La complexité de l'observation de ces phénomènes fait que leurs études sont réalisées essentiellement en laboratoire. Les données acquises par l'altimètre pourraient permettre de mieux appréhender ces mécanismes en calibrant en laboratoire les différentes voies, et notamment en fonction des propriétés du sédiment. Deux paramètres clefs nécessitent d'être suivis : la granulométrie du sédiment et son degré de consolidation. La quantification du tassement du sédiment et la dynamique à l'interface eau-sédiment seraient alors possibles, par une meilleure connaissance du comportement du sédiment cohésif.

2.2. Le rôle du bouchon vaseux dans l'implication du cycle lunaire de dépôt

Les mesures sur l'estuaire de Seine ont montré que le bouchon vaseux contrôle la sédimentation sur la vasière d'embouchure : le comportement spécifique de la vase fluide du bouchon vaseux entraîne un rythme de dépôt particulier sur la vasière d'embouchure, le cycle lunaire de plus fortes vives-eaux. Ce rythme de dépôt et sa mise en place sous la forme de vase fluide semblent singuliers. Cette étude a permis d'énoncer des hypothèses pour expliquer ce comportement : qualité du matériel, sa vitesse de chute, l'onde de marée spécifique. Il est alors souhaitable de comparer le rythme de dépôt de l'estuaire de Seine à celui d'autres estuaires possédant un bouchon vaseux ayant des propriétés (vitesses de chute, concentration...) différentes (Gironde, Loire).

Cette comparaison peut se faire à différents niveaux :

- Comparer les rythmes de dépôt des vasières intertidales associées à ces bouchons vaseux,
- Etudier le fonctionnement des vases fluides déposées sur les vasières de ces différents estuaires en caractérisant le type de matériel et son comportement,
- Comparer le fonctionnement de la vasière de l'estuaire de Seine à d'autres vasières localisées dans la zone du bouchon vaseux. Il apparaît déjà que les mesures récoltées sur la vasière du Trait, située à l'amont du bouchon vaseux a un forçage également lunaire.

Ce type de comparaison pourrait permettre de généraliser le fonctionnement sédimentaire spécifique dans les zones latérales, caractérisées par la présence du bouchon vaseux dans le chenal principal.

2.2. Evolution des vasières intertidales à l'échelle pluriannuelle

Le fonctionnement des vasières intertidales à différentes échelles de temps, de l'échelle du cycle semi-diurne à l'échelle du cycle annuel a mis en évidence le rôle de la marée, du débit fluvial et des évènements instantanés liés à l'agitation. Si l'étude est étendue à une échelle pluriannuelle, il apparaît que les variations climatiques (e.g. Delsinne, 2005 ; Massei et al., 2005) contrôlent l'importance des crues à des échelles de temps plus longues. Les variations interannuelles des débits liquides et apports sédimentaires associés peuvent contrôler fortement le fonctionnement de certaines vasières intertidales. A titre d'exemple, la vasière du Trait en estuaire de Seine, est soumise à des variations importantes des processus sédimentaires à l'échelle pluriannuelle. Au cours des années correspondant à de faibles crues (débit <1500 m³.s⁻¹), cette vasière a été le siège d'une sédimentation continue (taux de sédimentation moyen = 0.05 cm.jour⁻¹). A l'inverse, au cours des années de fortes crues (débit de crue > 1500 m³.s⁻¹), cette vasière a été érodée de façon importante. Le fonctionnement de cette vasière est un exemple de la nécessité de prendre en compte des échelles de temps plus longues, non seulement pour le fonctionnement des vasières intertidales, mais pour l'ensemble du fonctionnement du système estuarien de Seine. En effet, les variations de la pluviométrie et de l'intensité du vent à des échelles pluriannuelles ont d'autres conséquences en terme de transfert de particules. La localisation et la concentration du bouchon vaseux, les conditions d'envasement des vasières

intertidales et subtidales, l'intensité de la décharge de matériel particulaire issue de la crue sont des processus bien connus à l'échelle annuelle. Aucune étude n'a toutefois été menée sur ces variations pluriannuelles (Lesueur, 2001 ; Garnaud 2003), ce type d'analyse étant un champ d'études essentiel dans le cadre d'environnements macrotidaux soumis à des débits fluviaux conséquents, tels que l'estuaire de Seine.

Différentes raisons peuvent expliquer ce défaut d'études, notamment : l'absence d'enregistrements sédimentaires continus à ces échelles de temps et la nécessité d'utiliser des techniques adaptées afin de quantifier l'impact de ces phénomènes à long terme. Un champ d'investigation sur la sédimentation estuarienne est donc ouvert.

2.3. Interprétation des séquences lithologiques

Diverses techniques de traitement numérique du signal (analyse spectrale, décomposition en valeurs singulières, analyse en ondelettes continue) sont utilisées classiquement en climatologie et en hydrologie (e.g. : Zorita, 1992 ; Hurrell, 1995, Hurrell et van Loon, 1997 ; Torrence et Compo, 1998 ; Bojariu et Gimeno, 2003 ; Labat, 2005 ; Massei et al., 2005) et en sédimentologie pour des environnements estuariens et côtiers calmes (e.g. Yang et Nio, 1985 ; Tessier, 1989 ; Chapron et al., 2002 ; Stupples, 2002). D'autres techniques (analyse en ondelettes) sont très peu usitées en sédimentologie (Chapron et al., 2002). Or les premiers résultats de ce type d'analyse sur les niveaux de gris des carottes sédimentaires prélevées au sein des vasières intertidales estuariennes (Deloffre et al., soumis) montrent les avantages de l'utilisation de l'analyse spectrale en ondelettes sur la compréhension de l'enregistrement des enregistrements tidaux et annuel. Ces travaux en cours pourront permettre, couplés aux mesures altimétriques, de proposer une approche pour la compréhension de l'enregistrement des tidalites au sein des milieux sédimentaires estuariens.

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GENERALES

Les mécanismes contrôlant la dynamique des sédiments fins en milieu estuarien, notamment sur et dans les vasières intertidales, sont complexes. La pluralité des processus élémentaires à prendre en compte est importante et ces mécanismes ne sont pas toujours bien compris. Pourtant le besoin d'études des sédiments fins, cohésifs, est évident. Dans ce cadre, l'étude développée dans ce mémoire, portant sur le fonctionnement des vasières intertidales d'estuaires macrotidaux, consiste en une approche originale.

La stratégie d'étude est d'abord basée sur des mesures à haute résolution, haute fréquence et long terme du niveau topographique des vasières intertidales en des sites présélectionnés, du fait de la connaissance initiale des lieux. Cette approche se révèle particulièrement bien adaptée aux environnements estuariens macrotidaux, dont l'hydrodynamisme est contrôlé à différentes échelles de temps, de la minute, à quelques heures (cycle semi-diurne) et à l'échelle annuelle (variations débit fluvial).

L'étude sédimentaire des sites intra estuariens de l'estuaire de Seine permet de comprendre les transferts amont-aval au sein de l'estuaire. La comparaison des vasières à proximité de l'embouchure de plusieurs estuaires macrotidaux montre des séquences d'enregistrement propre à chaque site, en fonction de ses caractéristiques.

Pour chaque site, le suivi à haute fréquence et à haute résolution de l'altimétrie couplé à l'enregistrement des conditions hydrodynamiques, permet de comprendre et de quantifier finement les mécanismes contrôlant l'évolution des vasières intertidales à l'échelle semi-diurne : sédimentation, érosion par la marée ou la houle, tassement et comportement de la crème de vase.

L'ensemble des mesures effectuées démontre que le rôle des vasières intertidales estuariennes est à considérer pour comprendre le stockage, la transformation, la libération et le transfert des particules fines. Dans la partie amont de l'estuaire de Seine, les vasières stockent, dans la zone entre Poses et Rouen, de 10 à 30% des particules sédimentaires provenant de la crue hivernale. Le stockage se fait en période d'immersion complète de la vasière en crue, les courants de marée étant faibles à cette période. Le sédiment accumulé provisoirement est relargué en période d'étiage, par érosion suivant les cycles de marée semi-lunaires sur ces vasières découvrantes, ce qui représente de 30 à 50% du matériel particulaire transitant à Rouen en direction de l'aval. Ce transfert a été observé au cours de plusieurs crues d'amplitude variable.

A l'embouchure de la Seine, la disponibilité du sédiment est fonction de la dynamique du bouchon vaseux à l'embouchure de l'estuaire. Les vasières intertidales engraissent à l'échelle annuelle, avec des taux de sédimentation importants, de l'ordre de 18 cm.an⁻¹sur la vasière nord de la Seine. A la surface de cette dernière, désormais restreinte du fait du colmatage des marges estuariennes amplifié par les aménagements, la masse maximale de sédiment stocké au cours de l'année correspond de 25 à 40% de la masse maximale du

bouchon vaseux. Sur les vasières de l'Authie et de la Seine, bien que les taux annuels de sédimentation soient comparables, les rythmes de sédimentation sont différents. Sur la vasière de l'Authie, la sédimentation est continue, suivant le cycle semi-lunaire (14 jours). Sur la vasière d'embouchure de Seine, la sédimentation est discontinue, marquée par le cycle lunaire (cycle des plus fortes vives eaux, 28 jours). Cette rythmicité de dépôt est contrôlée par l'hydrodynamisme de la zone d'embouchure qui gouverne l'apport de sédiment à ces vasières : dans l'estuaire de l'Authie, le sédiment est disponible au cours de chaque période de vive eau alors que sur la Seine, l'apport et le dépôt s'effectuent uniquement au cours des périodes de fortes vives eaux par le développement accru des vitesses de courants et du bouchon vaseux issu en partie de la vase fluide des chenaux transverses.

En plus de cette contrainte liée au transport sédimentaire, le contexte géomorphologique des estuaires étudiés a une influence sur l'érosion par les houles : la vasière de l'Authie, protégée, n'est pas affectée par les épisodes de vagues fortes, alors que la vasière d'embouchure de la Seine, exposée, enregistre des épisodes d'érosion au cours des périodes de vent fort. Des érosions d'épaisseurs comprises entre 2 mm et 2 cm, dues à des vents d'orientation Ouest-Sud-Ouest et de vitesses supérieures à 12 m.s⁻¹ sont susceptibles de se produire une dizaine de fois dans l'année. Ces phases d'érosion participent donc activement aux transferts sédimentaires complexes qui se produisent dans la zone de l'embouchure de la Seine : on considère que chaque centimètre érodé du sédiment de la vasière correspond à 1% de la masse maximale du bouchon vaseux. A l'inverse, sur la vasière du Medway : ce site à la fois protégé et pauvre en sédiment disponible, montre des variations altimétriques aux amplitudes très faibles, de l'ordre du centimètre par an.

Pour compléter cette étude sur les processus sédimentaires sur les vasières intertidales, les propriétés et la lithologie des sédiments intertidaux ont été analysées respectivement grâce à des prélèvements de sédiment de surface (premier cm) à un pas de temps mensuel et aux carottages des sédiments superficiels (premiers dm). Les analyses du sédiment de surface ont montré que ses caractéristiques sont relativement constantes à l'échelle de l'année pour un même site, à l'exception de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine, où peuvent être apportées des particules sableuses au cours de périodes de tempêtes, et où une variation des propriétés de cohésion du sédiment est observée, en raison de l'occurrence de vase fluide au cours des périodes de dépôt. Le terme de tassement de ces vases a été considéré et contribue aux variations négatives de la topographie : de 20 à 40% de la diminution du niveau altimétrique au cours d'un dépôt d'une épaisseur de 2 à 8 cm.

Le couplage entre les mesures altimétriques et l'imagerie radiographique numérique des carottes permet de mieux comprendre l'enregistrement et la préservation des dépôts dans les environnements étudiés. Ainsi, les lamines correspondant à un épisode élémentaire de sédimentation semi-diurne, en concordance avec les mesures altimétriques, sont en général d'une épaisseur d'ordre centimétrique. Les séquences de dépôt semi-lunaire ou lunaire sont alors pluri-centimétriques. Toutefois, l'enregistrement est incomplet, y compris au sein de l'environnement protégé de la baie d'Authie, où tous les épisodes de dépôt liés au cycle

semi-lunaire ne sont pas enregistrés. La conservation et la reconnaissance des structures physiques au sein des vasières intertidales étudiées sont faibles en raison (i) de l'érosion par les courants de marée ou par les vagues, (ii) de la bioturbation qui déstructure et voile les lamines, (iii) des faibles variations de la granulométrie des sédiments sur les sites d'étude (faibles contrastes).

En résumé, le suivi altimétrique haute fréquence, haute résolution et long terme permet :

• d'examiner finement les processus et de quantifier les taux de sédimentation/érosion à l'échelle semi-diurne, même dans des conditions d'immersion totale des sites,

• de proposer une approche nouvelle sur les processus de tassement et de comportement de la vase fluide, en jumelant l'étude altimétrique avec des calibrations au laboratoire,

• de prendre en compte les processus sédimentaires à l'interface, les séquences de dépôt et d'érosion et de déterminer l'âge des dépôts dans le cadre d'études pluridisciplinaires,

• d'identifier les rythmes de sédimentation et d'érosion sur les vasières intertidales en fonction des forçages,

• de quantifier les transferts particulaires en fonction des paramètres sédimentaires et hydrodynamiques,

• d'étudier la reproductibilité des mécanismes sur les sites,

• de fournir des outils d'évaluation des forçages et/ou des stocks sédimentaires pour les sites étudiés,

• de proposer une modélisation conceptuelle ou empirique du fonctionnement des vasières intertidales à l'échelle annuelle,

• de corréler les séquences de dépôts enregistrés par l'altimètre aux enregistrements au sein des carottes sédimentaires.

Ce travail sur les vasières intertidales a permis de préciser les relations complexes entre les sources de matériel fin, l'hydrodynamisme, l'hydrologie, la morphologie de l'embouchure et l'évolution des vasières intertidales de l'échelle instantanée à l'échelle de l'annuelle. L'amélioration de la connaissance sur ces zones d'accumulation de sédiment fin permettra une meilleure prise en compte des vasières intertidales dans le cadre d'une gestion environnementale à l'échelle d'un estuaire.

REFERENCES

REFERENCES

- Allen, J.R.L., Duffy, M.J., 1998. Temporal and spatial depositional patterns in the Severn Estuary, southwestern Britain: intertidal studies at spring-neap and seasonal scales, 1991-1993. *Marine Geology*, 146, p. 147-171.
- Allen, J.R.L., 1981. Lower cretaceous tides revealed by cross-bedding with mud-drapes. Nature, 289, p. 579-581.
- Allen, G.P., Salomon, J.C., Bassoullet, P., Du Penhoat, Y., De Grandpré, C., 1980. Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sedimentary Geology*, 26, p. 69-90.
- Allen, G.P., 1972. Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde. Thèse d'état, Université Bordeaux I, 338 p.
- Amiard, 2005. Les sédiments : un compartiment clef pour l'évaluation des interactions entre contaminants chimiques et biota dans les écosystèmes estuariens, rapport final PNETOX, 59 pp.
- Amos, C.L., 1995. Siliciclastic tidal flats. In: G.M.E. Perillo (Ed.). Geomorphology and Sedimentology of Estuaries (pp. 273-306). Developments in Sedimentology, 53. Amsterdam: Elsevier.
- Amos, C.L., Van Wagoner, N.A., Daborn, G.R., 1988. The influence of subaerial exposure on the bulk properties of fine-grained intertidal sediment from Minas Basin, Bay of Fundy. *Estuarine and Coastal Shelf Science*, 27, p. 1-13.
- Andersen, T.J., Lund-Hansen, L.C., Pejrup, M., Jensen, K.T., Mouritsen, K.N., 2005. Biologically induced differences in erodibility and aggregation of subtidal and intertidal sediments: a possible cause for seasonal changes in sediment deposition. *Journal of Marine Systems*, 55, p. 123-138.
- Andersen, T.J., Jensen, K.T., Lund-Hansen, L., Mouritsen, K.N., Pejrup, M., 2002. Enhanced erodibility of fine-grained marine sediment by Hydrobia ulvae. *Journal of Sea Research*, 48, p. 51-58.
- Andersen, T.J., Pejrup, M., 2002. Biological mediation of the settling velocity of bed material eroded from an intertidal mudflat, the Danish Wadden Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, p. 737-745.
- Andersen, T.J., 2001. Seasonal variations in erodibility of two temperate, microtidal mudflats. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 53, p. 1-12.
- Andersen, T.J., Pejrup, M., 2001. Suspended sediment transport on a temperate, microtidal mudflat, the Danish Wadden Sea. *Marine Geology*, 173, p. 69-85.
- Anthony, E.J., Dobroniak, C., 2000. Erosion and recycling of estuary-mouth dunes in a rapidly infilling macrotidal estuary, the Authie, Picardy, northern France. In: Pye, K., Allen, J.R.L. (eds), Coastal and Estuarine Environments Sedimentology and Geoarchaelogy. Special publication of the Geological Society of London, 175, p. 109-121.
- Archer, A.W., 1996. Reliability of lunar orbital periods extracted from ancient cyclic tidal rhythmites. *Earth and Planetary Science Letters*, 141, p. 1-10.
- Austen, I., Andersen, T.J., Edelvang, K., 1999. The Influence of Benthic Diatoms and Invertebrates on the Erodibility of an Intertidal Mudflat, the Danish Wadden Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49, p. 99-111.
- Avoine, J., Lesueur, P., Rouault, T., 1996. Evolution morphologique et couverture sédimentaire de l'estuaire de la Seine: Programme Scientifique Seine-Aval, Rapport 1995/FIN 1 (Thème Hydrodynamique et transport sédimentaire), p. 2-20.
- Avoine, J., 1986. Evaluation des apports fluviatiles dans l'estuaire de la Seine, in Ifremer, editor, La baie de Seine (GRECO MANCHE): Caen, Ifremer, p. 117-124.
- Avoine J., 1982. Mécanismes contrôlant la dynamique des sédiments en suspension dans l'estuaire de la Seine. Mémoires de la Société Géologique de France, 144, p. 17-25.

- Avoine, J., Allen, G.P., Nichols, M., Salomon, J.C., Larsonneur, C., 1981. Suspended sediment transport in the Seine estuary, France. Effect of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology. *Marine Geology*, 40, p. 119-137.
- Avoine, J., 1981. L'estuaire de Seine: sédiments et dynamique sédimentaire, Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Caen, 236 p.

Bale, A.J., Morris, A.W., Howland, R.J.M., 1985. Seasonal sediment movement in the Tamar estuary. Oceanologica Acta, 8, p. 1-6.

- Bally, G., Mesnage, V., Verney, R., Clarisse, O., Dupont, J.P., Ouddane, B., Lafite, R., 2005. Dailysis porewater sampler: a strategy for time equilibration optimisation: Phosphates in sediments. *Proceedings of the 4th International Symposium*, edited by Serrano, L. & Golterman, H.L., Backhuys Publishers, The Netherlands, p 9-20.
- Bally, G., Mesnage, V., Deloffre, J., Clarisse, O., Lafite, R., Dupont, J.P., 2004. Chemical characterization of porewaters in an intertidal mudflat of the Seine Estuary: relationship to erosion-deposition cycles. *Marine Pollution Bulletin*, 49, p. 163-173.
- Bally, G., 2003. Etude de la dynamique d'échange du phosphore dans les sédiments d'une vasière intertidale de l'estuaire de Seine. Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 214 p.
- Balouin, Y., 1998. Enregistrement sédimentaire de la dynamique tidale dans une vasière intertidale de l'estuaire de la Gironde, Mémoire de DEA, Université Bordeaux, 30 p.
- Bals, J., 2002. Classification of European estuaries. Master's thesis, WL Delft Hydraulics, 65 p.
- Barham, A.J., Bates, M.R., 1991. A preliminary research report on the palaeoenvironmental and geoarchaeological significance of the North Kent Marshes.
- Bartholdy, J., Pheiffer-Madsen, P., 1985. Accumulation of fine-grained material in a Danish tidal area. Marine Geology, 68, p. 121-137.
- Baskaran, M., Ravichandran, M., Bianchi, T.S., 1997. Cycling of ⁷Be and ²¹⁰Pb in a high DOC, shallow, turbid estuary of south-east Texas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45, p. 165-176.
- Bassoullet, P., Le Hir, P., Gouleau, D., Robert, S., 2000. Sediment transport over an intertidal mudflat: field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Marennes-Oleron" (France). *Continental Shelf Research*, 20, p. 1635-1653.
- Beckinsale, R. P., 1969. River regimes: Ed R.J Chorley: Methuen, London, p. 455-472.
- Berlamont, J., Ockenden, M., Toorman, E.A., Winterwerp, J.C., 1993. The characterisation of cohesive sediment properties. *Coastal Engineering*, 21, p. 105-128.
- Bessineton, C., 1997. La création de vasières artificielles dans l'estuaire de la Seine. *In* Les estuaires Francais Evolution naturelle et artificielle, Actes de colloque n°2, p. 110-121.
- Billon, G., Ouddane, B., Boughriet, A., 2001. Chemical speciation of sulfur compounds in the surface sediments from three bays (Fresnaye, Seine and Authie) in northern France, and identification of some factors controlling their generation. *Talanta*, 53, p. 971-981.
- Bird, E.C.F., 1993. Submerging Coasts: The effect of a rising sea level on coastal environment, Wiley, Chichester, 184pp.
- Black, K.S., Paterson, D.M., Cramp, A., 1998. Sedimentary processes in the intertidal zone, The Geological Society, London, 410 p.
- Black, K.S., 1998. Suspended sediment dynamics and bed erosion in the high shore mudflat region of the Humber Estuary, UK. *Marine Pollution Bulletin*, 37, p. 122-133.
- Black, K.S., Paterson, D.M., 1997. Measurement of the erosion potential of cohesive marine sediments: a review of current in-situ technology, Journal of Marine Environmental Engineering, 4, p. 44-83.
- Bojariu, R., Gimeno, L., 2003. Predictability and numerical modelling of the North Atlantic Oscillation. Earth-Science Reviews, 63, p. 145-168.
- Bolam, S.G., Whomersley, P., 2005. Development of macrofaunal communities on dredged material used for mudflat enhancement: a comparison of three beneficial use schemes after one year. *Marine Pollution Bulletin*, 50, p. 40-47.

- Bolam, S.G., Schratzberger, M., Whomersley, P., 2004. Macrofaunal recolonization in intertidal mudflats: the effect of organic content and particle size. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 306, p. 157-180.
- Bolam, S.G., Rees, H., 2003. Minimising the impacts of maintenance dredged material disposal in the coastal environment: a habitat approach, *Environmental Management*, 32, p. 171-188.
- Boyd, R., Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A., 1992. Classification of clastic coastal depositional environments. Sedimentary Geology, 80, p. 139-150.
- Brenon, I., Le Hir, P., 1999a. Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): Identification of formation processes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49, p. 525-544.
- Brenon, I., Le Hir, P., 1999b. Simulation du bouchon vaseux dans l'estuaire de la Seine: capacité et limites d'un modèle bidimensionnel horizontal. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science*, 328, p. 327-332.
- Brenon, I., 1997. Modélisation de la dynamique des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 207 p.
- Briquet, A., 1930. Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique, Thèse de Sciences Naturelles, Université d'Orléans, 439 p.
- Brooks, D.A., Baca, M., Lo, Y.T., 1999. Tidal Circulation and Residence Time in a Macrotidal Estuary: Cobscook Bay, Maine. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49, p. 647-665.
- Bryan, G.W., Langston, W.J., 1992. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. *Environmental Pollution*, 76, p. 89-131.
- Burd, F., 1992. Erosion and vegetation change on the saltmarshes of Essex and north Kent between 1973 and 1988. Report No 42, Ed., Nature Conservancy Council, Peterborough.
- Burd, F., 1989. Saltmarsh survey of Great Britain, Research and Survey in Nature Conservation, No 17, Nature Conservancy Council, Peterborough.
- Cameron, W.M., Pritchard D., 1963. Estuaries: The sea, Ed. Hill M.N., Wiley, Intersciences, v. 2, p. 306-324.
- Cappucci, S., Amos, C.L., Horsoe, T., Umgiesser, G., 2004. SLIM: a numerical model to evaluate the factors controlling the evolution of intertidal mudflats in Venice Lagoon, Italy. *Journal of Marine Systems*, 51, p. 257-280.
- Castaing, P., 1981. Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes Cas de la Gironde. Thèse de Doctorat d'état, Université Bordeaux I, 530 p.
- Chapron, E., Desmet, M., de Putter, T., Loutre, M.F., Deconinck, J.F., Beck, C., 2002. Late Millenium climate variability at 45°N : results from lake Le Bourget (NW Alps, France), *The Holocene*, 12, p. 177-182.
- Chen, C.T., Millero, F.J., 1977. Speed of sound in seawater at high pressures. Journal of Acoustic Society of America, 62, p. 1129-1135.
- Chester, T.J., Ockenden, M.C., 1997. Numerical modeling of mud and sand mixtures. Cohesive Sediments, N. Burt, R. Parker & J. Watts (eds)., John Wiley and Sons, New York, NY, U.S.A., p. 395-406.
- Chester, T.J., Ockenden, M. C., 1994. Tidal transport of mud/sand mixtures. Developments of an integrated numerical model: HR Wallingford Report, 380 p.
- Choi, K.S., Dalrymple, R.W., 2004. Recurring tide-dominated sedimentation in Kyonggi Bay (west coast of Korea): similarity of tidal deposits in late Pleistocene and Holocene sequences. *Marine Geology*, 212, p. 81-96.
- Choi, K.S., Kim, B.O., Park, Y.A., 2001. Late Pleistocene tidal rhythmites in Kyonggi Bay, west coast of Korea: a comparison with simulated rhythmites based on modern tides and implications for intertidal positioning. *Journal of Sedimentary Research*, 71, p. 681-692.
- Christie, M.C., Dyer, K.R., Turner, P., 1999. Sediment flux and bed-level measurements from a macrotidal mudflat. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49, p. 667-688.

- Ciffroy, P., Reyss, J.L., Siclet, F., 2003. Determination of the residence time of suspended particles in the turbidity maximum of the Loire estuary by ⁷Be analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, p. 553-568.
- Clarisse, O., 2003. Approche Géochimique du Fonctionnement et de la Dynamique des Vasières de l'Estuaire de la Seine, Thèse de Doctorat, Université de Lille I, 201 p.
- Cooper, J.A.G., 2002. The role of extreme floods in the estuary-coastal behavior: contrast between river- and tide-dominated microtidal estuaries. *Sedimentary Geology*, 40, p. 127-137.
- Coppens, A.B., 1981. Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters (with comparisons to other equations). *Journal of Acoustic Society of America*, 69, p. 862-863.
- Couperthwaite, J.S., Mitchell, S.B., West, J.R., Lawler, D.M., 1998. Cohesive sediment dyanmics on an inter-tidal bank on the tidal Trent, UK. *Marine Pollution Bulletin*, 37, p. 144-154.
- CSLHN (Cellule de Suivi du Littoral Haut Normand), 1999. Etude sur la restauration et la création de vasières intertidales. Conv. Etude Port Autonome du Havre, 98, 172 p.
- Cundy, A.B., Hopkinson, L., Lafite, R., Spencer, K., Taylor, J. A., Ouddane, B., Heppell, C.gM., Carey, P.J., Charman, R., Shell, D., Ullyott, S., 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, p. 1195-1208.
- Cundy, A.B., Lafite, R., Taylor, J.A., Hopkinson, L., Deloffre, J., Charman R., Gilpin, M., Spencer, K., Carey, P.J., Heppell, C.M., Ouddane, B., De Wever, S., 2005. Sediment transfer and accumulation in two contrasting saltmarsh/mudflat systems: the Seine estuary (France) and the Medway estuary (UK). *Hydrobiologia, accepté.*
- Cuvilliez, A., 2003. Morphodynamique actuelle d'une vasière estuarienne intertidale. Cas de la Grande Vasière de l'estuaire de la Seine. Couplage de la télédétection basse altitude et de l'altimétrie à haute résolution, Mémoire de DEA, Université de Rouen, 34 p.
- Da Silva, R.J., 2002. Action des vagues sur les estrans et vasières. Application à l'estuaire de Seine, Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 220 p.
- Da Silva R.J., Le Hir P., 2001. Response of stratified muddy beds to water waves. In Coastal and estuarine fine sediment processes, *Proceeding in Marine Sciences*, W.H. McAnally and A.J. Mehta (Eds), Elsevier Science, 95-108.
- Dade, B.W., Davies, J.D., Nichols, P.D., Nowell, A.R.M., Thistle, D., Trexler, M.B., White, D.C., 1990. Effects of bacterial exopolymer adhesion on the entrainment of marine sand. *Geomicrobiology Journal*, 8, p. 1-16.
- Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A. Boyd R., 1992. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62, p. 1130-1146.
- Dalrymple, R.W., Knight, R.J., Lambiase, J.J., 1978. Bedforms and their hydraulic stability relationships in a tidal environment, Bay of Fundy, Canada. *Nature*, 275, p. 100-104.
- Davidson, N.C., 1991. Nature Conservation and Estuaries in Great Britain, Nature Conservancy Council, Peterborough.
- Davies, J.H., 1964. A morphological approach to the world of shorelines. Zeitschrift für Geomorphology, 8, p. 127-142.
- de Deckerke, E.M.G.T., Kornman, B.A., Staats, N., Termaat, G. R., de Winder, B., Stal, L.J., Heip, C.H.R., 2002. The seasonal dynamics of benthic (micro)organisms and extracellular carbohydrates in an intertidal mudflat and their effect on the concentration of suspended sediment, in J.C. Winterwerp et Kranenburg, C., Fine Sediment Dynamics in the Marine environment, editor, Elsevier Amsterdam.
- de Wit, P.J. Kranenburg, C., 1997. The wave-induced liquefaction of cohesive sediment beds. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45 (2), p. 261-271.
- de Wit, P.J., Kranenburg, C., 1996. On the effect of a liquefied mud bed on waves and flow characteristics. *Journal of Hydraulic Research*, 34, p. 3-18.

Decho, A.W., 2000. Microbial biofilms in intertidal systems: an overview. Continental Shelf Research, 20, p. 1257-1273.

- Del Grosso, V.A., 1974. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). *Journal of Acoustic Society of America*, 56, p. 1084-1091.
- Delo, E.A., Ockenden, M.C., 1992. Estuarine muds manual, SR 309, HR Wallingford.
- Deloffre, J., Verney, R., Lafite, R., Lesueur P., Lesourd, S., Cundy, A., 2006. Sedimentation cycles on intertidal mudflats at the mouth of macrotidal estuaries, *Marine Geology*, soumis.
- Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S., Verney, R., Guézennec, L., 2005a. Sedimentary processes on a fluvial estuarine mudflat: the macrotidal Seine example (France). Estuarine and Coastal Shelf Science, 64, p. 710-720.
- Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., Verney, R., Lesourd, S, Cuvilliez, A., Taylor, J.. 2005b. Interactions between intertidal mudflat and turbidity maximum in macrotidal estuarine context. *Marine Geology, accepté (publication août 2006)*.
- Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, R., 2005c. Rythmes de dépôt sur des vasières intertidales actuelles : apports du couplage mesures altiétriquesanalyse lithologique à haute résolution. 10 ^{ème} Congrès Français de sédimentologie, livre des résumés, p. 81.
- Delsinne, N. 2005. Evolution pluri-millénaire à pluri-annuelle du prisme sédimentaire d'embouchure de la Seine. Facteurs de contrôle naturels et d'origine anthropique. Thèse de Doctorat, Université de Caen, 179 p.
- Dionne, J.C., 1988. Characteristics features of modern tidal flats in cold regions. In De Boer, P.L., van Gelder, A., Nio, S.D. (Eds.), Tidalinfluenced sedimentary environments and facies. Reidel, Dordrecht, pp. 301-332.
- Dionne, J.C., 1984. An estimate of ice-drifted sediments based on the mud content of the ice cover at Montagny, Middle St Lawrence estuary. *Marine Geology*, 54, p. 148-166.
- Dionne, J.C., 1963. Vers une définition plus adéquate de l'estuaire du Saint-Laurent. Zeitschrift für Geomorphology, 7, p. 36-44.
- Dobroniak, C., Anthony, E., 2002. Short-term morphological expression of dune sand recycling on a macrotidal, wave-exposed estuarine shoreline. *Journal of Coastal research, Special Issue*, 36, p. 240-248.
- Dobroniak, C., Anthony, E., 2001. Transfert sédimentaires au sein d'un estuaire macrotidal anthropisé, l'Authie: implications en termes d'aménagement, Rapport du programme INTERREG II kent-Nord-Pas-de-Calais (1999-2001), p. 19-35.
- Dupont, J.P., 2001. Matériaux fins, Fascicule du programme Seine-Aval, Ifremer ed., 39 p.
- Dupont, J.P., Guezennec, L., Lafite, R., Dethleff, D., Huault, M.F., Wang, H.Q., Lacroix, M., Meyer, R., 1996. Processus hydrosédimentaires de l'estuaire: Programme Scientifique Seine-Aval, Rapport 1995/FIN 1 (Thème Hydrodynamique et transport sédimentaire), p. 33-64.
- Dupont, J.P., Wang, H.Q., Lafite, R., Meyer, R., Texier, H., 1995. Grain size and settling velocity of suspended matter of the Seine estuary. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences; Geosciences*, 320, p. 961-968.
- Dupont, J.P., Lafite R., Huault M.F., Homméril, P., Meyer R., 1994. Continental/marine ratio changes in suspended and settled matter across a macrotidal estuary (The Seine estuary, northwestern France). *Marine Geology*, 120, p. 27-40.
- Dyer, K.R., Christie M.C., Manning A.J., 2004. The effects of suspended sediment on turbulence within an estuarine turbidity maximum. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59, 237-248.
- Dyer, K.R., Christie, M.C., Wright, E.W., 2000. The classification of intertidal mudflats. Continental Shelf Research, 20, p. 1039-1060.
- Dyer, K.R., Manning, A.J., 1999. Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimension. *Journal of Sea Research*, 41, p. 87-95.
- Dyer, K.R., 1998. The typology of intertidal mudflats: In Geomorphology and Sedimentology of estuaries. Developments in Sedimentology, 53, p. 423-449.
- Dyer, K.R., 1997. Estuaires: A physical introduction: Wiley, London eds, 140 p.

- Dyer, K.R. 1995. Sediment transport processes in estuaries. In G.M.E. Perillo (Ed.). Geomorphology and Sedimentology of Estuaries (pp. 423-449). Developments in Sedimentology, 53. Amsterdam: Elsevier.
- Dyer, K.R., 1994. Estuarine Sediment transport and deposition, In Pye, K. (Ed.), p. 193-217.

Dyer, K.R., 1986, Coastal and estuarine sediment dynamics: J. Wiley ans Sons publication, 342 p.

- Eckman, J.E., Nowell, A.R.M., Jumars, P.A., 1981. Sediment destabilisation by animal tubes. Journal of Marine Research, 39, p. 361-374.
- Eisma, D., Li, A., 1993. Changes in suspended matter flocs size during the tidal cycle in the Dollard estuary. *Netherlands Journal of Sea Research*, 31, p. 107-117.
- Eisma, D., 1993. Suspended mater in the Aquatic environment, Springer-Verlag, 315 p.
- Emery, K.O., Milliman, J., 1978. Suspended matter in surface waters: influence of river discharges and of upwelling. *Sedimentology*, 25, p. 125-140.
- Fan, D., Li, C., 2002. Rhythmic deposition on mudflats in Mesotidal Changjiang estuary, China. Journal of Sedimentary Research, 72, p. 543-551.
- Fairbridge, R.W., 1980. The estuary: its definition and geodynamic cycle. In E. Olausson and I. Cato (Eds.), Chemistry and biogeochemistry of estuaries (pp. 1-35), Wiley, New-York.
- Fettweiss, M., van den Eynde D., 2003. The mud deposits and the high turbidity in the Belgian-Dutch coastal zone, southern bight of the North Sea. *Continental Shelf Research*, 23, p. 669-691.
- Fischer, H.B., 1976. Mixing and dispersion in estuaries. Annual Review Fluid Mechanics, 8, p. 107-133.
- Flinchem, E.P., Jay, D.A., 2000. An introduction to wavelet transform tidal analysis methods. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51, p. 177-200.
- Friend, P.L., Lucas, C.H., Rossington, S.K., 2005. Day-night variation of cohesive sediment stability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 64*, p. 407-418.
- Frostick, L.E., Mc Cave, I.N., 1979. Seasonal shifts of sediment within an estuary mediated by algal growth. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 9, p. 569-576.
- Fugate, D.C., Friedrichs, C.T., 2002. Determining concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV, OBS and LISST. Continental Shelf Research, 22, p. 1867-1886.
- Gallenne, B., 1974. Les accumulations turbides de l'estuaire de la Loire. Etude de la crème de vase, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 323 p.
- Garnaud, S., 2003. La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle macrotidale: la baie de Seine Sud-Orientale (France), Thèse de Doctorat, Université de Caen, 378 p.
- Garnaud, S., Lesueur, P., Clet, M. Lesourd, S., Garlan, T., Lafite, R., Brun-Cottan, J.C., 2003. Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner-shelf setting (eastern Bay of the Seine, France). *Marine Geology*, 202, p. 33-54.
- Germaneau, J., 1974. Etude de la sédimentation dans la Seine et son bassin, Thèse de 3eme cycle, Université Bordeaux I, 84 p.
- Germaneau, J., 1968. Caractères généraux de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine. Travaux du Centre de Recherche et d'Etudes Océanographiques, v. VIII, p. 1-63.
- Glangeaud, L., 1938. Transport et sédimentation dans l'estuaire et l'embouchure de la Gironde (caractères pétrographiques et formations fluviatiles, saumâtres, littorales et récétiques). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 8, p. 149-157.
- Golbuu, Y., Victor, S., Wolanski, E., Richmond, R.H. 2003. Trapping of fine sediment in a semi-enclosed bay, Palau, Micronesia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, p. 941-949.

- Gough, M., Fothergill, J. Hendrie, J., 1994. A survey of southern Englet coastal waters for the s-triazine anti-fouling compound Irgarol 1051. *Marine Pollution Bulletin*, 28, p. 613-620.
- Gouleau, D., Jouanneau, J.M., Weber, O., Sauriau, P.G., 2000. Short- and long-term sedimentation on Montportail–Brouage intertidal mudflat, Marennes–Oléron Bay (France). *Continental Shelf Research*, 20, p. 1513-1530.
- Gouleau, D., 1976. Ascension capillaire et variation de la teneur en eau de la pellicule superficielle des vasières découvrantes atlantiques. *Journal de la Recherche Océanographique*, v. 1, n°3.
- Gouleau, D., 1975. Les premiers stades de la sédimentation sur les vasières littorales atlantiques. Rôles de l'émersion, Thèse d'état, Université de Nantes, 363 p.
- Grant, J., Gust, G., 1987. Prediction of coastal sediment stability from phytopigment content of mats of purple sulphur bacteria. *Nature*, 9, p. 244-246.
- Gratiot, N., Mory, M. Auchère, D., 2000. An acoustic Doppler velocimeter (ADV) for the characterisation of turbulence in concentrated fluid mud. *Continental Shelf Research*, 20, p. 1551-1567.
- Green, M.O., Black, K.S., Amos, C.L., 1997. Control of estuarine sediment dynamics by interactions between currents and waves at several scales. *Marine Geology*, 144, p. 97-116.
- Groen, P., 1967. On the residual transport of suspended matter by an alternating tidal current. *Netherlands Journal of Sea Research*, 3, p. 546-574.
- Grün, I., 1997. Etude de la couverture sédimentaire et des vasières entre Poses et Duclair, Mémoire de DEA, Université de Lille I, 49 p.
- Guézennec, L., 1999. Hydrodynamique et transport en suspension du matériel fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal : l'exemple de la Seine (France): Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 237 p.
- Guézennec, L., Lafite, R., Dupont, J.P., Meyer, R., Boust, D., 1999. Hydrodynamics of suspended particulate matter in the tidal freshwater zone of a macrotidal estuary (the Seine estuary, France). *Estuaries*, 22, p. 717-727.
- Guilcher, A., 1965, Précis d'Hydrologie Marine et Continentale: Masson, Paris: Paris, 389 p.
- Hansen, D.V., Rattray, M., 1966. New dimensions in estuary classification. Limnology and Oceanography, 11, p. 319-326.
- Harris, P.T., Heap A.D., Bryce S.M., Porter-Smith, R., Ryan, D.A., Heggie, D.T., 2002. Classification of Australian clastic coastal depositional environments based on a quantitative analysis of wave, tide and river power. Journal of Sedimentary Research, 72, p. 852-870.
- Harrison, D.J., D'Olier, B., 1995. Marine sand gravel resources of the Thames Estuary, A report to British Geological Survey, Report No. WB/95/01/C, British Geological Survey, London.
- Hayes, M.O., 1975. Morphology of sand accumulations in estuaries: Le Cronin (eds), Estuarine Research, Academic Press, N.Y, v. 2, p. 3-22.
- Hayter, E.J., Mehta, A.J., 1986. Modelinjg cohesive sediment transport in estuarial waters. Applied Mathematical Modelling, 10, p. 294-303.
- Hayter, E.J., Mehta, A.J., 1982. Modelling of estuarial fine sediment transport for tracking pollutant movement. Final report n° UFL/COEL-8L/009. University of Florida.
- Hesslein, R.H., 1976. An in-situ sampler for close interval porewater studies. Limnology and Oceanography, 21, p. 912-914.
- Hoyez, B., Cuvilliez, A., 2002. La Grande Vasière de l'estuaire de la Seine: typologie et cartographie. Bulletin de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre, 88, p. 36.
- Hurrell, J.W., Van Loon H., 1997. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. Climatic Change, 36, p. 301–326.

Hurrell, J.W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. Science, 269, p. 676-679.

- Jay, D.A., Flinchem, E.P., 1999. A comparison of methods for analysis of tidal records containing multi-scale non tidal background energy. *Continental Shelf Research*, 19, p. 1695-1732.
- Jay, D.A., Flinchem, E.P., 1997. Interaction of fluctuating river flow with a barotropic tide: A demonstration of wavelet tidal analysis methods. Journal of Geophysical Research, 102, p. 5705-5720.
- Jestin, H., Bassoullet, P., Le Hir, P., L'Yavanc, J., Degres, Y., 1998. Development of ALTUS, a high frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition and erosion of sediments. Oceans'98, Conference Proceedings, 1/3, p. 189-194.
- Jing, L., Ridd P.V., 1996. Wave-current bottom shear stresses and sediment resuspension in Cleveland bay. *Australian Coastal Engineering*, 29, p. 169-186.
- Kang, J.W., Jun, K.S., 2003. Flood and ebb dominance in estuaries in Korea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 56, 1, p. 187-196.
- Kawanisi, K., Yokosi, S., 1997. Characteristics of suspended sediment and turbulence in a tidal boundary layer. *Continental Shelf Research*, 17, p. 859-875.
- Kim, S.C., Friedrichs, C.T., Maa, J. P.Y., Wright, L.D., 2000. Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126, p. 399-406.
- Kynch, 1952. A theory of sedimentation. Faraday Society Transactions, 48, p. 166-176.
- Kirby, R., 1990. The sediment budget of the erosional intertidal zone of the Medway Estuary, Kent. *Proceedings of the Geologists Association*, 101, p. 63-77.
- Kirby, R., Bleakley, R.J., Weatherup, S.T.C., Raven, P.J., Donaldson, N.D., 1993. Effect of episodic events on tidal mudflat stability, Armillan Bay, Strangford Lough, Northern Ireland. In Mehta, A.J. (Ed), Nearshore and Estuarine Marine Cohesive Sediment Transport, Coastal and Estuarine Studies, Vol. 42. Am. Geoph. U., Washington, DC, p. 378-392.
- Kirby, R., Parker, W.R., 1983. Distribution and behaviour of fine sediment in the Severn Estuary and Inner Bristol channel, U.K. *Canadian journal* of fisheries and aquatic science, 40, p. 83-95.
- Krone, R.B., 1962, Flume studies of the transport of sediments in estuarial processes: Final Report, Hydrau. Eng. Lab. and sanitary eng. Res. Lab., University of California, Berkerley, California.
- Kvale, E.P., Cutright, D., Archer, A.W., Johnson, H.R., Pickett, B., 1995. Analysis of modern tides and implications for ancient tidalites. *Continental Shelf Research*, 15, p. 1921-1943.
- Kvale, E.P., Archer, A.W., Johnson, H.R., 1989. Daily, monthly and yearly tidal cycles within laminated siltstones of the Manfield Formation (Pennsylvanian) of Indiana. *Geology*, 17, p. 365-368.
- Labat, D., Godderis, Y., Probst, J.L., Guyot, J.L., 2005. Reply to comment of Legates et al. Advances in Water Resources. 28, p. 1316-1319.
- Lafite, R., 2001. Impact de la dynamique tidale sir le transfert des sédiments fins. Mémoire d'Habilitation à Diriger la Recherche, Livret II, Université de Rouen, 79 p.
- Lafite, R., Romaña, L.A., 2001. A man-altered macrotidal estuary: The Seine estuary (France): Introduction to the special issue. *Estuaries*, 24, p. 939.
- 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, 293 p.
- Larsonneur, C., 1971. Manche et Baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles, Thèse d'état, Université de Caen, 394 p.
- Lawler, D.M., 2005, The importance of high-resolution monitoring in erosion and deposition dynamics studies : examples from estuarine and fluvial systems. *Geomorphology*, 64, p. 1-23.

- Le Floch, J.F., 1961, Propagation de la marée dynamique dans l'estuaire de la Seine et la Seine maritime. Thèse d'état, Université de Paris, 507 p.
- Le Hir, P., Cann, P., Waeles, B., Bassoullet, P., 2005. Erodability of natural Sediments : towards an erosion law for sand/mud mixtures from laboratory and field erosion tests. *Intercoh proceedings 2005*, p. 92-93.
- Le Hir, P., Ficht, A., Da Silva Jacinto, R., Lesueur, P., Dupont, J.P., Lafite, R., Brenon, I., Thouvenin, B. Cugier, P., 2001. Fine sedimentation transport and accumulations at the mouth of the Seine Estuary (France). *Estuaries*, 24, p. 950-963.
- Le Prévost, C., Fornerino, M., Villaret C., 1986. Sur l'hydrodynamique de la baie de Seine. Résultats d'observation et de modélisation. p. 43-48. In GRECO-Manche (Eds.), La baie de Seine. Université de Caen 24-26 Avril 1985. Actes de colloque N°4. IFREMER, Brest.
- Lee, H.J., Hyung, R.J., Chu, Y.S., Bahk, K.S., 2004. Sediment transport on macrotidal flat in Garolim bay, west coast of Korea: signification of wind waves and asymmetry of tidal current. *Continental Shelf Research*, 24, p. 821-832.
- Leloup, J., Petit, F., Boust, D., Bally, G., Clarisse, O., Quillet L., 2005. Dynamic of sulfate-reducing microorganisms (dsrAB genes) in two contrasting mudflats of the Seine estuary (France). Microbial Ecology, 50, p. 307-314.
- Lesourd, S., Brun-Cottan, J.C., Lesueur, P., Deloffre, J., Lafite, R., Caillaud, J., Philippe, S., 2005. Etude du tassement des vases de l'estuaire de Seine: Rapport Final du programme Seine-Aval 2004, action physique et sédimentologie.
- Lesourd, S., Lesueur P., Brun-Cottan, J.C., Garnaud, S., Poupinet, N., 2003. Seasonal variations in the characteristics of superficial sediments in a macrotidal estuary (the Seine inlet, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58, p. 3-16.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.C., Auffret, J.P., Poupinet, N., Laignel, B., 2001. Morphosedimentary evolution of the macrotidal Seine estuary subjected to human impact. *Estuaries*, 24, p. 940-949.
- 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, 290 p.
- Lesueur, P., Lesourd, S., Lefebvre, D., Garnaud, S., Brun-Cottan, J.C., 2003. Holocene and modern sediments in the Seine estuary (France): a synthesis. *Journal of Quaternary Science*, 18, p. 339-349.
- Lesueur, P., 2001. Dynamique et archivage des flux continentaux de particules fines dans le domaine côtier : exemples de modèles actuels, Mémoire d'Habilitation à Diriger la Recherche, Livret I, Université de Caen, 149 p.
- Lesueur, P., Lesourd, S., 1999. Sables, chenaux, vasières: dynamique des sédiments et évolution morphologique, Fascicule du programme Seine-Aval, Ifremer ed., 39 p.
- Lesueur, P., 1992. Les vasières de la plate-forme Ouest-Gironde (France). Modèle faciologique et archive sédimentaire des flux côtiers, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, 197 p.
- Lofi, J., Weber, O., 2001. SCOPIX digital processing of X-ray images for the enhancement of sedimentary structures in undisturbed core slabs. *Geo-Marine Letters*, 20, p. 182-186.
- Maa, J.P.Y., Mehta, A.J., 1987. Mud erosion by waves: a laboratory study. Continental Shelf Research, 7, p. 1269-1284.
- Manning, A.J., Dyer, K.R., Lafite, R., Mikes, D., 2004. Flocculation measured by video-based instruments in the Gironde estuary during the european commission SWAMIEE project. *Journal of Coastal Research*, 41, p. 59-69.
- Manning, A.J., 2004. Observations of the properties of flocculated cohesive sediment in three western european estuaries. *Journal of Coastal Research*, 41, p. 70-81.
- Manning, A.J., Dyer, K.R., 1999. A laboratory examination of floc characteristics with regard to turbulent shearing. *Marine Geology*, 160, p. 147-170.
- Mac Kenzie, K.V., 1981, Nine-term equation for the sound speed in ocean. Journal of Acoustic Society of America, 70, p. 807-812.

- Massei, N., Durand, A., Deloffre, J., Dupont, J.-P., Laignel, B., Valdes, D., 2005. On the influence of North Atlantic Oscillation on rainfall variability in Northwestern France over the past 35 years, accepté à *Journal of Geophysical Research*.
- Mazumder, R., Arima, Z., 2005. Tidal rhytlmites and their implications. Earth and Science Reviews, 69, p. 79-85.
- Mc Cave, I.N., 1985, Recent shelf clastic sediments: in Sedimentology, recent developments and applied aspects, Stow, D.A.V. & Piper, D.J.W. ed. Soc. of London, pub., v. 15, p. 49-65.
- Mc Cave, I.N., 1972. Transport and escape of fine-grained sediments from shelf areas: in Shelf Sediment Transport, process and pattern, Swift, D. and Pilkey, N. (eds), Dowdenn, Hutchinson and Ross, p. 225-248.
- Meadows, P.S., Meadows, A., 1991. The environmental impact of burrows and burrowing animals.: Proc. Zoological Soc. London, Clarendon Press, Oxford.
- Mehta, A.J., 1991. Understanding fluid mud in a dynamic environment. Geo-marine Letters, 11, p. 113-118.
- Meybeck, M., Mouchel, J.M., Idlafkih, Z., Andreassian, V., Thibert, S., 1998. Transfert d'eau, de matières dissoutes et particulaires dans le réseau fluvial: La Seine en son bassin Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé: ED. Meybeck, M., De Marsily, et Fustec, E., Elsevier, Paris, 345-389 p.
- Migeon, S., Weber, O., Faugeres, J.-C., Saint-Paul, J., 1999. SCOPIX: A new X-ray imaging system for core analysis. *Geo-Marine Letters*, 18, p. 251-255.
- Migniot, C., 1991. Les estuaires : étude comparative des caractéristiques géométriques, hydrauliques et sédimentologiques. Les ouvrages d'aménagement et la méthodologie des études, Rapport LCHF/SOGREAH N. R54258, p. 160.
- Migniot, C., 1989. Tassement et rhéologie des vases: La Houille Blanche, 1-2, p. 11-29 ; 95-111.
- Migniot, C., Larsonneur, C., Dangeard, L., 1968. Etude expérimentale de l'érosion par les courants de dépôts vaseux plus ou moins concentrés. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 266, p. 441-444.
- Mitchell, S.B., Lawler, D.M., West, J.R., Couperthwaite, J.S., 2003. Use of continuous turbidity sensor in the prediction of fine sediment transport in the turbidity maximum of the Trent Estuary, UK. *Estuarine and Coastal Shelf Science*, 58, p. 645-652.
- Mitchener, H., O'Brien, D.J., 2001. Seasonal variability of sediment erodability and properties on a macrotidal mudflat, Peterstone Wentloodge, Severn Estuary, U.K, in Mc Anally, W. H. a. M., A.J., editor, Fine sediment transport Dynamics in the Marine Environment, Proceeding in Marine Science, Elsevier, p. 301-321.
- Mitchener, H., Torfs, H., Whitehouse, R.J.S., 1996. Erosion of mud/sand mixtures: Coastal Engineering, v. 29, p. 1-25. (Errata, 1997, v. 30, p. 319).
- Mulder, T., Weber, O., Anschutz, P., Jorissen, F.J., Jouanneau, J.M., 2001. A few months-old storm-generated turbidite deposited in the Capbreton Canyon (Bay of Biscay, SW France). *Geo-marine Letters*, 21, p. 149-156.
- Nichols, M.M., Biggs R.B., 1985. Estuaries: Davis, R.A., Jr. (Ed), Coastal Sedimentary Environments, Springer-Verlag, N.Y., p. 77-173.
- Nikora, V., Goring, D.G., Ross, A., 2002. The structure and dynamics of the thin near-bed layer in a complex marine environment: a case study in Beatrix Bay, New Zealand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, p. 915-926.
- O'Brien, D.J., Whitehouse R.J.S. Cramp, A., 2000. The cyclic development of a macrotidal mudflat on varying timescales. *Continental Shelf Research*, 20, p. 1593-1619.
- Ockenden, M.C., 1993. A model for the setting of non-uniform cohesive sediment in a laboratory flume and an estuarine field setting. *Journal of Coastal Research*, 9, p. 1094-1105.
- Pardé, M., 1943. Cours de potamologie: Ecole des Ingénieurs Hydrauliciens, v. 1-2.
- Partheniades, E., 1962. Erosion and deposition of cohesive soils. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, v. 19, N°HY1, p. 407-415.
Paterson, D.M., Black, K. S., 1999. Water flow, Sediment Dynamics and benthic biology. Advances in Ecological Research, 29, p. 155-193.

- Paterson, D.M., 1997. Biological mediation of sediment erodibility: ecology and physical dynamics, in Burt, N., Parker, R., Watts, J., Cohesive sediments, editor, Wiley, J. & Sons, London, p. 215-229.
- Paterson, D.M., Crawford, R.M., Little, C., 1990. Subaerial exposure and changes in the stability of intertidal estuarine sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 30, p. 541-556.
- Paterson, D.M., 1989. Short term changes in the erodability of intertidal cohesive sediments related to the migratory behavihour of epipelic diatoms: Limnology and Oceanography, 34, p. 223-234.
- Pejrup, M., Andersen, T.J., 2005. Long-Term and high-resolution measurements of bed level changes in a temparate, microtidal coastal lagoon. Intercoh proceedings 2005, p. 40-41.
- Pejrup, M., Andersen, T.J., 2000. The influence of ice on sediment transport, deposition and reworking in a temperate mudflat area, the Danish Wadden Sea. *Continental Shelf Research*, 20, p. 1621-1634.
- Pejrup, M., 1988a. Flocculated suspended sediment in a micro-tidal environment: Sedimentary Geology, 57, p. 249-256.
- Pejrup, M., 1988b. Suspended sediment transport across a tidal flat. Marine Geology, 82, p. 187-198.
- Perillo, G.M.E., 1995. Definitions and geomorphologic classifications of estuaries. In: G.M.E. Perillo (Ed.). Geomorphology and sedimentology of estuaries (pp. 17-47). Developments in Sedimentology, 53. Amsterdam: Elsevier.
- Petchick, J.S., 1993. The Medway Estuary; Coastal Processes and Conservation, Insitute of Coastal and Estuarine Studies, University of Hull, Hull.
- Petchick, J.S., 1992a. The geomorphology of mudflats. In K.F. Nordstrom and C.T. Roman eds.: Woley and Sons Ltd, Chechester, p. 185-211.
- Petchick, J.S., 1992b. Saltmarsh geomorphology, In: Allen, J.R.L and Pye, K (Eds.), Saltmarshes, Cambridge University Press.
- Petchick, J.S., Legget, D., Husain, L., 1990. Boundary layers under salt marsh vegetation developed in tidal currents: Thornes J.B., Vegetation and erosion processes and environments, Wiley, J. & Sons, London, p. 113-124.
- Porcher, M., 1977. Lithostrtatigraphie des alluvions fluviatiles holocènes de la basse vallée de la Seine. L'estuaire de la Seine au Quaternaire. Bulletin de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre, XIV, p. 181-201.
- Potsma, H., 1961. Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1, p. 148-190.
- Preston, J.M., 1977. Industrial Medway, an Historical Overview, W & J Mackay Ltd., Chatham.
- Pritchard, D., Hogg, A.J., 2003. Cross-shore sediment transport and the equilibrium morphology of mudflats under tidal currents. *Journal of Geophysical Research*, 108.
- Pritchard, D., 1967, What is an estuary : physical point of view: ed. H Lauff, estuaries, AAAS Washington, CD. Pub., v. 83.
- Pritchard, D., 1960, Lectures on estuarine oceanography: B. Kinsman (Editor), J. Hopkins Univ., p. 154.
- Pritchard, D., 1955. Estuarine circulation patterns. Proceeding ASCE, v. 81, p. 1-11.
- Pritchard, D., 1952. Estuarine hydrography. Advances in Geophysics, 1, p. 243-280.
- Pye, K., French, P.W., 1993. Targets for Coastal Habitat Recreation, A report for English Nature, Cambridge Environmental Research Consultants, Cambridge.
- Reed, D.J., 1990. The impact of sea-level rise on coastal salt marshes. Progress in Physical Geography, 14, p. 465-481.
- Ross, M.A., 1989. Vertical structure of estuarine fine sediment suspensions, PhD Thesis, University of Florida, Gainsville, Florida, USA.
- Ross, M.A., Mehta, A.J., 1989. On the mechanics of lutocline and fluid mud. Journal of coastal research, 15, p. 51-61.

- Ryan, D.A., Heap, A.D., Radge, L., Heggie, D.T., 2003. Conceptual models of Australia's estuaries and coastal waterways. *Report Geosciences Australia Record*, 09, p. 135.
- Ryan, N.M., Cooper, J.A.G., 1998. Spatial variability of tidal-flats in response to wave exposure: examples from Strangford Lough, Northern Ireland.: Geological Society of London Special Publication 139, 221-230 p.
- Salomon, J.C., Allen, D.G., 1983. Rôle sédimentologique de la marée dans les estuaires à fort marnage. *Compagnie Française des Pétroles, Notes et Mémoires*, 18, p. 35-44.
- Sanchez, M.A., Grovel, A., 1994. Dynamique des matériaux cohésifs dans l'estuaire de la Loire. *Journal de la Recherche Océanographique*, 9, p. 196-201.
- Schoellhamer, D.H., 1996. Anthropogenic sediment resuspension mechanisms in a shallow microtidal estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 43, p. 533-548.
- Shen, J., Haas L., 2004. Calculating age and residence time in the tidal York River using three-dimensional model experiments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61, p. 449-461.
- Shennan, I., 1989. Holocene crustal movements and sea level changes in Great Britain, Journal of Quaternary Science, 4, p. 77-90.
- Shi, Z., Chen P.Y., 1996. Morphodynamics and sediments dynamics on intertidal mudflats in China (1961-1994). *Continental Shelf Research*, 16, p. 1909-1926.
- Simon, C., 2001. Fonctionnement d'une vasière d'eau douce dans la partie fluviale d'un estuaire macrotidal, Mémoire de Maîtrise, Université de Caen, 40 p.
- Simmons, H.B., 1955. Some effect of uplet discharge on estuarine hydraulics. Proceeding Soc. Clv. Engin., 81, p. 1-20.
- Simpson, J.H., Williams, E., Brasseur, L.H., Brubaker, J.M., 2005. The impact of tidal straining on the cycle of turbulence in a partially stratified estuary. *Continental Shelf Research*, 25, p. 51-64.
- 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 Bordeaux I, 184 p.
- Soulsby, R.L., 1983. The bottom boundary layer of shelf seas. In John, B. (ed), Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Spencer, K.L., 2000. The recent geochemistry of the inter-tidal sediments of the Medway Estuary, Kent, UK. PhD thesis, University of Greenwich (U.K.).
- Stanley, D.J., Addy, S.K., Behrens, E.W., 1983. The mudline: variability of its position relative to shelf break, In Stanley, D.J. et Moore, G.T. (eds), The shelf break: critical interface on continental margins, Special publication, 33, p. 279-298.
- Stumpf, R.P., 1983. The process of sedimentation on the surface of a salt marsh. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 17, p. 495-508.
- Stupples, P., 2002. Tidal cycles preserved in late Holocene tidal rhythmites, the Wainway Channel, Romney Marsh, southeast England. *Marine Geology*, 110, p. 355-367.
- Teisson, C., Ockenden, M., Le Hir, P., Kranenburg, C., Hamm, L., 1993. Cohesive sediment transport processes. *Coastal Engineering*, 21, p. 41-69.
- Terzaghi, K., Peck R.B., 1967. Soils Mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons, New York.
- Tessier, B., Archer, A.W., Lanier, W.P. Feldman, H.R., 1995. Comparison of ancient tidal rhythmites (Carboniferous of Kansas and Indiana, USA) with modern analogues (the bay of Mont-Saint-Michel, France). *Special Publications of the International Association of Sedimentologists*, 24, p. 259-271.

- Tessier, B., 1993. Upper intertidal rhythmites in the Mont-Saint-Michel Bay (NW France): perspectives for paleoreconstruction. *Marine Geology*, 110, p. 355-367.
- Tessier, B., Gigot, P., 1989. A vertical record of different tidal cyclicities. An example from the Miocene marine molasse of Digne (Haute Provence, France). *Sedimentology*, 36, p. 767-776.
- Tolhurst, T.J., Gust, G., Paterson, D.M., 2002. The influence of an Extracellular Polymeric Substance (EPS) on cohesive sediment stability, in Winter & Kranenburg, J.C., Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment, Proceedings in Marine Science, editor: Elsevier, Amsterdam, p. 409-425.
- Tolhurst, T. J., Black, K. S., Paterson, D. M., Mitchener, H., Termaat, G. R., Shayler, S. A., 2000. A comparison and measurement standardisation of four sediments. *Continental Shelf Research*, 20, p. 1397-1418.
- Torfs, H., Mitchener, H., Huysentruyt, H., Toorman, E.A., 1996. Settling and consolidation of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering*, 29, p. 27-45.
- Torrence, C., Compo G.P., 1998. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of American Meteorologist Society, 79, p. 61-78.
- Touron, A., Berthe, T., Leloup, J., Deloffre, J., Petit, F. 2005. Faecal contamination of sediments from estuarine mudflats (Seine, France). *Hydrobiologia, soumis.*
- Uncles, R.J., 2002. Estuarine physical processes research : some recent studies and progress. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55, p. 829-856.
- Uncles, R.J., Stephens, J.A., Smith, R.E., 2002. The dependence of estuarine turbidity on tidal intrusion length, tidal range and residence time. *Continental Shelf Research*, 22, p. 1835-1856.
- 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., Tappin, A.D., 2000. Seasonal variability of salinity, temperature, turbidity and suspended chlorophyll in the Tweed Estuary. *The Science of Total Environment*, 251-252, p. 115-124.
- Uncles, R.J., Stephens J.A., 2000. Observations of currents, salinity, turbidity and intertidal mudflat characteristics and properties in the Tavy Estuary, UK. Continental Shelf Research, 20, p. 1531-1549.
- Uncles, R.J., Stephens, J.A., Harris, C. 1998. Seasonal variability of subtidal and intertidal distribution in a muddy, macrotidal estuary: the Humber Ouse, UK. In Black, K.S., Paterson, D.M., Cramp, A. (Eds), Sedimentary Processes in the Intertidal Zone, Vol. 139, Geol. Soc. London, p. 211-219.
- van der Broek, W.L.F., 1979. Seasonal levels of chlorinated hydrocarbons and heavy metals in fish and brown shrimps from the Medway Estuary, Kent. *Environmental Pollution*, 19, p 21-37.
- van Kessel, T., Bloom, C., 1998. Rheology of cohesive sediment: comparison between a natural and an artificial mud. *Journal of Hydraulic Research*, 34, p. 591-612.
- van Kessel, T., Kranenburg, C., 1998. Wave-induced liquefaction and flow of subaqueous mud layers. Coastal Engineering, 34, p. 109-127.
- van Ledden, L., van Kesteren, W.G.M., Winterwerp, J.C., 2004. A conceptual framework for the erosion behaviour of sand-mud mixtures. *Continental Shelf Research*, 24, p. 1-11.
- van Leussen, W., 1999. The variability of settling velocities of suspended fine-grained sediment in the Ems estuary. *Journal of Sea Research*, 41, p. 109-118.
- van Leussen, W., 1997. The Kolmogorov microscale as a limiting value for the floc sizes of suspended fine-grained sediment in estuaries, in Burt, N., Parker, R., Watts, J., Cohesive sediments, editor, John Wiley & Sons, p. 45-62.
- van Leussen, W., 1988. Aggregation of particles, settling velocities of mud flocs, a review, Proc. Int. Symp. Physical processes in estuaries, Springler-Verlag, New York, p. 347-403.

van Straaten, L.M.J.U., Kuenen, P.H., 1958. Tidal action as a cause of clay accumulation. Journal of Sedimentary Petrology, 28, p. 403-413.

- Verger, F., 1968. Marais et Wadden du littoral Francais, Biscaye ed., 541 p.
- Verney, R., 2006. Procesus de controle de la dynamique des sediments fins. Mesures in-situ, measures expérimentales et modélisation. Application à l'estuaire de Seine. Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 327 p.
- Verney, R., Brun-Cottan, J.C., Lafite, R., Deloffre, J., 2005a. Spatial neap-spring tidal-induced turbulence variability above intertidal mudflats in a macrotidal estuary. Application to the Seine estuary. *Estuaries*, accepté.
- Verney, R., Deloffre, J., Brun-Cottan, J.C., Lafite, R., 2005b. Wave induced turbulence on intertidal mudflats : impact of navigation and wind. Application to the macrotidal Seine estuary (France). *Journal of Coastal Research*, soumis.
- Verhnet, E., 2000. Comparaison du fonctionnement morphosédimentaire de vasières intertidales d'un estuaire à fortes marées : application à l'estuaire de Seine, Mémoire de DEA, Université de Lille I, 45 p.
- Voulgaris, G., Meyers, S.T., 2004a. Net effect of rainfall activity on salt-marsh sediment distribution. Marine Geology, 207, p. 115-129.
- Voulgaris, G., Meyers, S.T., 2004b. Temporal variability of hydrodynamics; sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek. *Continental Shelf Research*, 24, p. 1659-1683.
- Voulgaris, G., Trowbridge, J.H., 1998. Evaluation of the acoustic doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements. *Journal of Atmospheric and oceanic technology*, 15, p. 272-289.
- Waeles, B., Le Hir, P., Lesueur, P. 2005. A 3D morphodynamic process-based modelling of a mixed sand/mud coastal environment : The Seine estuary France. *Intercoh proceedings 2005*, p. 68-69.
- Wells, J.T., 1995. Tide-dominated estuaries and tidal rivers. In: G.M.E. Perillo (Ed.). Geomorphology and Sedimentology of Estuaries (pp. 179-205). Developments in Sedimentology, 53. Amsterdam: Elsevier.
- Wells, J.T., 1987. Entrapment of shelf-destined mud, Cape Lookout Bight, NC, South-eastern section of the Geological Society of America, Abstracts with Progress, 135.
- West, M.S., West, J.R., 1991. Spatial and temporal variations in intertidal zone properties in the Severn estuary, UK, in Elliott, M., Ducrotoy, J.P., editor, Estuaries and Coasts, Alson and Alson, Fredensborg, p. 25-30.
- Wharf, J.R., Van der Broek, W.L.F., 1977. Heavy metals in macro-invertebrates and fish from the Lower Medway Estuary, Kent. *Marine Pollution Bulletin*, 8, 31-34.
- Whitehouse, R.J.S., Soulsby, R.L., Roberts, W., Mitchener, H., 2000a, Dynamics of estuarine muds, Editor: HR Wallingford, UK, 210 p.
- Whitehouse, R. J. S., Bassoullet, P., Dyer, K. R., Mitchener, H. J., Roberts, W., 2000b. The influence of bedforms on flow and sediment transport over intertidal mudflats: *Continental Shelf Research*, 20, p. 1099-1124.
- Whitehouse, R.J.S., Mitchener, H.J., 1998. Observations of the morphodynamics behavior of an intertidal mudflat at different timescales. In: Black, K.S., Paterson, D.M., Cramp, A. (Eds), Sedimentary Processes in the Intertidal Zone, Vol. 139, Geol. Soc. London, p. 255-271.
- Widdows, J., Brinsley, M.D., 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, p. 43-156.
- Widdows, J., Lucas, J.S., Brinsley, M.D., Salkeld, P.N., Staff, F.J., 2002. Investigation on the effect of current velocity on mussel feeding and mussel bed stability using an annular flume. *Helgolet Marine Research*, 56, p. 3-12.
- Winterwerp, J.C., Van Kesteren, W.G.M., 2004. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment, Development in Sedimentology, 56, Van Loon, T. (ed), Elsevier Amsterdam.
- Winterwerp, J.C., 2002. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. Continental Shelf Research, 22, p. 1339-1360.

- Woerther, P., 1999. Coastal water quality of the Seine bay area monitoring by a new french system of automated data buoys. EEZ technology: ICG Publishing Ltd, London.
- Wong, G.S.K., Zhu, S., 1995. Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure. *Journal of Acoustic Society of America*, 97, p. 1732-1736.
- Woodruff, J.D., Geyer, W.R., Sommerfield, C.K., Driscoll, N.W., 2001. Seasonal variations of sediment. Marine Geology, 179, p. 105-119.
- Yallop, M.L., de Winder, B., Paterson, D.M., Stal, L.J., 1994. Comparative structure, primary production adn biological stabilisation of cohesive and non-cohesive sediments inhabited by microphytobenthos. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 39, p. 565-582.
- Yang, C.S., Nio, C.D., 1985. The estimation of paleohydrodynammic processes from subtidal deposits using time series analysis methods. *Sedimentology*, 32, p. 41-57.
- Young, R.N., Southard, J.B., 1978. Erosion of fine-grained marine sediments: sea floor et laboratory experiments. *Geological Society American Bulletin*, 89, p. 663-672.
- Zhang, W., Yu, L., Hutchinson, S.M., Xu, S., Chen, Z., Gao, X., 2001. China's Yangtze estuary : I. Geomorphic influence on heavy metal accumulation in intertidal sediments. *Geomorphology*, 41, p. 195-205.
- Zorita, E., Kharin, V., Storch, H. 1992. The atmospheric circulation and sea surface temperature in the North Atlantic area in winter: Their interaction and relevance for Iberian precipitation. *Journal of Climate*, 5, p. 1097-1108.

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

FIGURES

Chapitre I

Figure I-1 : Représentation schématique d'un estuaire d'après Dionne (1963), Pritchard (1967), Dalrymple et al. (1992) et Perillo (1995)	. 15
Figure I-2 : Schéma du mode de mélange des eaux douces et des eaux salées selon la classification de Pritchard (1955). (A) : Estuaire à co salé, (B) : Estuaire partiellement mélangé, (C) : Estuaire homogène	vin 17
Figure I-3 : Exemple de morphologies illustrant les différents types d'estuaires selon la classification de Pritchard (1960)	18
Figure I-4 : Les différents types d'estuaires selon la classification de Le Floch (1961).	19
Figure I-5 : Classification des estuaires en fonction des critères hydrodynamiques (d'après Dalrymple et al., 1992)	20
Figure I-6 : Variations des hauteurs d'eau au Havre (données PAR)	22
Figure I-7 : Propagation de l'onde de marée dans les milieux estuariens : exemple de l'estuaire de la Seine (données PAR)	23
Figure I-8 : Distribution des vitesses maximales de flot et de jusant sur l'ensemble de l'estuaire de Seine, en période d'amplitude de marée moyenne et un débit moyen (d'après Avoine et al., 1981)	23
Figure I-9 : Comparaison des débits solides et liquides annuels des fleuves du monde	24
Figure I-10 : Circulation résiduelle de densité dans un estuaire	25
Figure I-11 : Diagramme de Simmons (1955) pour les estuaires de Seine et de Gironde. (Avoine, 1981)	26
Figure I-12 : Distribution de l'énergie au sein d'un estuaire « à marée » selon la classification de Dalrymple et al., 1992	27
Figure I-13 : Schéma des différentes origines du matériel en suspension au sein des estuaires (Eisma, 1986, Eisma, 1993)	28
Figure I-14 : Exemples de spectres granulométriques au sein des vasières intertidales d'embouchure étudiées	29
Figure I-15 : Evolution de la contrainte d'érosion en fonction du mélange sable-vase (d'après Chester et Ockenden, 1994)	30
Figure I-16 : Schéma des processus de transport, dépôt et remise en suspension des vases au cours du cycle de marée semi-diurne	31
Figure I-17 : Evolution de la taille des MES en relation avec la vitesse de chute des particules (Dupont , 2001).	32
Figure I-18 : Relations entre concentration et vitesse de chute pour différents estuaires européens	33
Figure I-19 : Formation et relations entre les différentes couches turbides	34
Figure I-20 : Mécanismes à l'origine de la formation du bouchon vaseux	35
Figure I-21 : Concentration du bouchon vaseux de l'estuaire de la Seine en fonction du cycle de marée lunaire en période d'étiage (débit < m ³ .s ⁻¹ (d'après Avoine, 1981)	200 36
Figure I-22 : Profils verticaux N-S de turbidité (/O CMH) dans les eaux de la Baie de Seine, au cours de la basse mer et en crue, suivant diffrentes conditions d'agitation (Avoine, 1981).	37
Figure I-23 : Position et concentration du bouchon vaseux de l'estuaire de la Gironde en fonction du débit fluvial, mesures en morte-eau à L mer (d'après Castaing, 1981).	basse 38
Figure I-24 : Schéma conceptuel du transfert particulaire en étiage, à l'échelle du cycle vive-eau morte-eau dans la partie fluviale de l'estua Seine (Guézennec, 1999).	ire de 39

Figure I-25 : Représentation des différentes zones d'accumulation des vases de plate-forme (d'après McCave, 1972)40	9
Figure I-26 : Schéma conceptuel des mécanismes de sédimentation et de consolidation des vases, liés au dépôt de crue	1
Figure I-27 : Processus et forçages sur l'évolution des vasières intertidales estuariennes	2
Figure I-28 : Exemples d'érosion à la surface de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine après une période de tempête. (A) : Galets mo (10 cm de diamètre), (B) : Plaques d'arrachement (diamètre de 1 m)	ous 4
Figure I-29 : Représentation schématique du rôle des organismes dans la stabilisation/déstabilisation du sédiment de vasières intertidales45	5
Figure I-30 : Fentes de dessiccation à la surface de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine	7
Figures I-31 : Exemples d'éléments morphologiques de la surface de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine. (A) : Falaise à l'extrémité de la vasière (1 m de haut), (B) : Chenaux transverses au niveau de la slikke (0,3 à 5 m de profondeur), (C) : Structures en « ridge and runnels » (50 cm à 1 m de longueur d'onde ; photo : S. Lesourd)48	8
Figure I-32 : Classification des vasières intertidales (d'après Dyer et al., 2000). LS : pente faible ; VS : pente moyenne ; VSS : pente forte50	2
Figure I-33 : Localisation des sites d'étude localisé dans la partie marine des estuaires (modifié d'après Cundy et al., 2005b). (A) estuaire du Medway (Kent, Grande-Bretagne) ;(B) estuaire de l'Authie (Pas-de-Calais, France, ;(C) estuaire de Seine (Haute-Normandie, France)52	2
Figure I-34 : Photographie de la vasière d'embouchure de l'estuaire du Medway	3
Figure I-35 : Photographie de la vasière d'embouchure de la baie d'Authie55	5
Figure I-36 : Localisation des sites d'études dans l'estuaire de Seine (d'après Guézennec, 1999)	5
Figure I-37 : Coupe longitudinale orientée Nord-Sud de la vasière de Oissel (d'après Lesourd, 2000)	9
Figure I-38 : Photos des chenaux transverses de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine	9
Figure I-39 : Les périodes d'étude sur les différentes vasières intertidales. Données SNS	2
Figure I-40 : Photographie de l'altimètre ALTUS	4
Figure I-41 : Evolution de l'erreur de mesure de la distance entre la surface et l'échosondeur liée aux variations de la vitesse du son dans l'eau (A) en fonction de différents types de fond (distance échosondeur-surface : 30 cm), (B) en fonction de la distance entre l'échosondeur et surface (fond vaseux)	ı. <i>Ia</i> 6
Figure I-42 : Erreur topographique induite par les variations de la vitesse du son dans l'eau. Comparaison des données théoriques (équation de Coppens) et des résultats expérimentaux	e 7
Figure I-43 : Impact de la variation de la vitesse du son dans l'eau sur les chroniques d'altimétrie de l'estuaire du Medway	9
Figure I-44 : Evolution des voies altimétriques au cours du tassement de la crème de vase de l'estuaire de Seine	9
Figure I-45 : Liquéfaction des vases au cours d'un épisode d'agitation : exemple de la vasière Nord de l'estuaire de la Seine	1
Figure I-46 : Liquéfaction des vases au cours d'un passage de bateau : cas de la vasière du Trait dans l'estuaire de la Seine	2
Figure I-47 : Evolution de l'écho max. de l'altimètre au cours du déplacement des rides	3
Figure I-48 : Interprétation des variations topographiques et de l'écho max. de l'altimètre sur le site de Pennedepie	4
Figure I-49 : Corrélation des mesures de la topographie de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine suivant la méthode des piquets et l'altimètre ALTUS	5

Chapitre II

Figure II-1 : Exemple d'accumulation de vases au sein de la zone fluviale de l'estuaire de Seine. (A) : Au niveau d'un bras mort, (B) : Au niveau d'une île
Figure II-2 : Variations des débits liquides de la Seine au cours de la période 1996-2006 (données SNS). Guézennec, 1999 : Suivi piquets en période d'accroissement du débit fluvial. Deloffre, 2005 : Suivi altimétrique en période de décroissance du débit fluvial
Figure II-3 : Spectres granulométriques typiques des échantillons de sédiments prélevés dans l'estuaire fluvial
Figure II-4 : Les modalités d'érosion sur la vasière intertidale de Oissel (A) Erosion progressive au cours des périodes de vives-eaux d'étiage, (B) Erosion événementielle liée au passage d'un bateau
Figure II-5 : Evolution du stockage des particules fines dans l'estuaire fluvial (Poses-Rouen) en fonction du débit solide de la Seine en période de crue

Chapitre III

Figure III-1 : Photographie à marée basse de la zone d'embouchure de l'estuaire de Seine et localisation des points de mesures (Photo : A.
Cuvilliez.)
Figure III-2 : Log interprétés à partir des descriptions et des photographies des carottes courtes prélevées le long d'une radiale N-S sur la
vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine (Lesourd, 2000, modifié)
Figure III-3 : Granulométrie de la crème de vase étudiée en laboratoire pour les processus de tassement
Figure III-4 : Modèle de tassement appliqué aux données ALTUS comparé aux données non corrigées
Figure III-5 : Variations topographiques et hauteurs d'eau enregistrées au cours de la campagne de télédétection à basse altitude
Figure III-6 : Schéma simplifié du fonctionnement du modèle hydrosédimentaire de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine
Figure III-7 : Evolution de la densité humide du sédiment au cours du temps générée par le tassement du sédiment de la vase fluide sur la
vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine
Figure. 111-8 : Comparaison des données du modèle et de l'enregistrement altimétrique sur la vasière (données brutes)

Chapitre IV

Figure IV-1 : Observation des variations topographiques à l'échelle du cycle semi-diurne sur l'estuaire de Seine au cours d'un cycle de plus for	tes
vives-eaux	72
Figure IV-2 : Variations des contraintes hydrodynamiques et sédimentaires au cours d'un cycle de marée de vive-eau moyenne sur la vasière de	de
Seine	4
Figure IV-3 : Variations des contraintes hydrodynamiques et sédimentaires au cours d'un épisode de vent (8-10 m.s ⁻¹ , période de 6-8 s, haute	eurs
significatives des vagues 0,15 à 0,3 m) sur la vasière de Seine15	5
Figure IV-4 : Influence du degré de cohésion du sédiment sur l'érosion générée par la houle sur l'estuaire de Seine. (A) en période de dépôt	
(période de vive-eau) ; (B) en période d'érosion (période de morte-eau)15	6
Figure IV-5 : Schéma simplifié des processus sédimentaires à l'échelle semi-diurne en fonction de la concentration de MES dans la colonne d'e	au
et de la contrainte de cisaillement au fond. (L'ordre de grandeur des processus à la surface des vasières est indiqué)	8

- Figure IV-6 : Comparaison des litages dans différents environnements tidaux (A à C : Tessier et al., 1995 ; D : Lesourd, 2002). (A) Baie du Mont-Saint-Michel, Actuel, France (diamètre de l'échelle : 2,8 cm). (B) Argiles « de Lawrence » au Kansas, Carbonifère, USA (échelle verticale 1 cm). (C) Formation « Brésil » en Indiana, Carbonifère, USA (échelle verticale 1 cm). (D) Vasière intertidale de l'estuaire de Seine, France. Gauche : Positif de RX : Vases en clair, sables en sombre. Droite : Log lithologique représentatif. (A), (B) et (C) : Les flèches indiquent les lamines imputées aux périodes de morte-eau. Lamines argileuses en sombre.

- Figure IV-10 : Comparaison des données altimétriques et la partie sommitale d'une carotte prélevée le 14/04/04 sur l'estuaire de l'Authie ... 163

Chapitre V

Figure V-1 : Schéma synthétique des connaissances actuelles sur le fonctionnement des vasières de l'estuaire de Seine (amont-aval) en
distinguant les conditions de crue et d'étiage
Figure V-2 : Schéma de synthèse du fonctionnement des vasières intertidales à l'échelle de l'estuaire de Seine
Figure V-3 : Evolution de la concentration en ammonium dans la colonne d'eau et le sédiment de la vasière d'embouchure de l'estuaire de Seine
(Bally et al., 2004, modifié)
Figure V-4 : Profils de cadmium particulaire en fonction de la profondeur sur la vasière de Oissel (Clarisse, 2001 modifié). (A) profils non recalés
(données brutes), (B) profils recalés en fonction des variations topographiques
Figure V-5: Distribution verticale des indicateurs fécaux sur la vasière de Oissel, en Mai 2005. CFU : Unité de coliformes

TABLEAUX

Tableau I-A : Comparaison des conditions hydrologiques et hydrodynamiques dans les estuaires étudiés	56
Tableau I-B : Caractéristiques techniques constructeur de l'altimètre ALTUS	64
Tableau I-C : Impact des variations de la vitesse du son dans l'eau à différentes échelles de temps basé sur le calibrage de l'altimètre	e en
laboratoire et les données des réseaux de surveillance estuariens	68
Tableau III-A : Correspondance utilisée dans le modèle entre vitesse du vent et hauteurs significatives des vagues	08

RESUME

Les vasières intertidales estuariennes correspondent à des zones de stockage temporaire ou pérenne de sédiments cohésifs. Le fonctionnement hydro-sédimentaire des vasières intertidales des estuaires macrotidaux nécessite de prendre en compte différentes échelles de temps du cycle semi-diurne au cycle pluriannuel.

L'objectif de cette étude est de comprendre et de quantifier le transport sédimentaire en domaine estuarien par des mesures haute fréquence, haute résolution et long terme des variations altimétriques de la surface des vasières intertidales. La prise en compte d'échelles de temps emboîtées permet d'appréhender le rôle respectif des paramètres hydrodynamiques : la marée, le débit fluvial, la houle et le batillage.

Les résultats acquis sur les sites de l'estuaire de Seine, de l'amont à l'aval, et la comparaison du fonctionnement de différentes vasières à l'embouchure (Authie, Medway, Seine) soulignent le rôle clef des vasières intertidales dans le transfert des sédiments fins vers la mer.

Dans la partie amont de l'estuaire de Seine, la crue contrôle les dépôts temporaires de sédiment fins tandis qu'en période d'étiage, les cycles de marée semi-lunaire érodent ces dépôts. A l'embouchure de l'estuaire, la marée contrôle la sédimentation grâce à l'apport du bouchon vaseux selon un cycle lunaire.

La comparaison des résultats obtenus sur les trois vasières d'embouchure possédant des caractéristiques morphologiques et sédimentaires différentes confirme le rôle de la source sédimentaire et de la morphologie de l'estuaire sur le transfert des sédiments fins en domaine intertidal estuarien.

La mesure altimétrique haute-fréquence permet d'identifier et de comprendre les séquences lithologiques enregistrées au sein des carottes sédimentaires. La comparaison des séquences de sédimentation/érosion et la connaissance de l'âge des dépôts apportent une information précieuse, indispensable à l'interprétation des profils bio-géochimiques.

Mots clefs : sédiment cohésif, sédimentation, érosion, tassement, hydrodynamique, estuaire macrotidal, vasière intertidale, instrumentation acoustique.

ABSTRACT

Intertidal mudflats constitute temporary or permanent storage areas of cohesive sediments. Understanding hydrodynamic and sedimentary behaviour of intertidal mudflats in macrotidal context requires to consider various timescales ranging from semi-diurnal to annual cycles.

The aim of this study is to better apprehend and quantify sediment transport processes on intertidal mudflats in estuarine systems. This work is based on high frequency, high resolution and long term measurements of bed level at the studied sites. Studying the evolution of intertidal mudflats at different timescales highlights the respective role of each controlling hydrodynamic forcing parameters, i.e. tidal cycles, river flow, wind waves and/or boat-induced waves.

Results obtained on the Seine estuary, i.e. from the fluvial part to the marine one, and the comparison of the sedimentary behaviour of different mudflats located at the mouth of the Medway, Authie and Seine estuaries underline the key role played by the intertidal mudflats on the seaward transfer of fine sediments.

In the upstream part of the Seine estuary, high river flow discharges are controlling /control sedimentation while during low river flow erosion processes are controlled by the fortnightly tidal cycles. At the mouth of the Seine estuary, sedimentation is controlled by the turbidity maximum dynamic at the lunar timescale. Comparing the sedimentary processes above intertidal mudflats located at the mouth of three morpho-sedimentologically different estuaries confirms the role of the sediment supply and the morphology of the mouth on the behaviour of intertidal mudflats.

High-frequency bed level monitoring permits to identify and understand lithological sequences recorded in the sedimentary cores. Comparison of erosion/sedimentation sequences and the knowledge of deposit ages bring/provide useful information for the interpretation of bio-geochemical processes.

Keywords: cohesive sediment, sedimentation processes, erosion processes, consolidation processes, hydrodynamic forcing, macrotidal estuary, intertidal mudflats, acoustic device.



UMR CNRS 6143 – M2C Morphodynamique Continentale et Côtière Universités de Caen et Rouen

