

UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

Dynamique des sédiments fins et mixtes des zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron

Caractérisation des sédiments, processus hydro-sédimentaires et modélisation appliquée



THESE DE DOCTORAT

Sciences pour l'environnement

Spécialité : Gestion des ressources et qualité des milieux

ECOLE DOCTORALE DE LA ROCHELLE

Présentée et soutenue publiquement

Le 15 décembre 2009 à l'Université de la Rochelle

Par M^r Stéphane KERVELLA

Devant le jury composé de :

Robert LAFITE, Professeur, Université de Rouen - Rapporteur

Yannick MELINGE, Maître de Conférences, HdR, INSA de Rennes - Rapporteur

Aldo SOTTOLICHIO, Maître de Conférences, Université de Bordeaux I

Philippe GOULLETQUER, Cadre de Recherche, Ifremer, Paris

Invité : Pierre LE HIR, Cadre de Recherche, Ifremer, Brest

Président du jury : Vaclav SOBOLIK, Professeur, Université de La Rochelle

Serge ROBERT, Cadre de Recherche, Ifremer, La Rochelle - Responsable scientifique

Anne PANTET, Professeur, Université du Havre - Directrice de thèse



Ce travail de recherche a été possible grâce au soutien financier du Conseil Général de Charente-Maritime et de la région Poitou-Charentes qui ont assuré le financement du salaire et de l'étude pendant les trois années de thèse de doctorat. Cette étude n'aurait pu avoir lieu sans le soutien scientifique et technique important du laboratoire LERPC-Ifremer de la Tremblade-l'Houmeau et du laboratoire DYNECO/PHYSED-Ifremer de Brest.

Remerciements

En Septembre 2005 je suis entré au CREMA (Centre de Recherche sur les Ecosystèmes Marins et Aquacoles) de l'Houmeau. Cette structure mixte CNRS - IFREMER a, par la suite, évolué au cours de ma thèse. C'est ainsi que j'ai eu, aussi, le privilège de connaître, en 2006, le CRELA (Centre de Recherche sur les Ecosystèmes Littoraux Anthropisés, CNRS-IFREMER-Université La Rochelle), avant d'être définitivement intégré au LER/PC IFREMER, en 2008.

Ce parcours de trois ans dans ces différents laboratoires a été, pour moi, une formidable expérience, riche de rencontres et d'échanges avec de nombreux chercheurs qui tous ont contribué, peu ou prou, à la réalisation de ce travail. Ma dette de reconnaissance, envers toutes ces personnes, est immense.

En tout premier lieu, je tiens à remercier Mr Serge ROBERT, qui a été mon encadrant scientifique à l'Houmeau. Cette thèse n'aurait pu avoir lieu sans son obstination à mettre en place une étude d'une telle ampleur sur la baie de Marennes-Oléron. Je tiens à souligner le rôle majeur qu'il a joué dans la réalisation de ce travail. Serge, nos relations ont été, parfois, un peu « houleuses », mais cela n'empêche pas que je te suis très reconnaissant d'avoir su guider mes pas, aussi bien sur le terrain des vasières, que, par la suite, lors de la synthèse et de la rédaction de ce manuscrit. Merci, bien sur, pour tes précieux conseils ; merci enfin, plus simplement, pour m'avoir accordé ta confiance, et m'avoir accueilli au sein de ton équipe.

En second lieu, je voudrai adresser mes remerciements à ma directrice de thèse, Anne PANTET, qui a bien voulu accepter d'encadrer une thèse dont le sujet était bien loin de ses travaux de recherche habituels. J'espère que tu as pris du plaisir à découvrir un environnement aussi varié que l'est celui de la baie de Marennes-Oléron. Malgré la distance, tu m'as appris beaucoup de choses sur les techniques d'analyse du comportement mécanique des sédiments et tu as su me pousser, scientifiquement, dans le bon sens

Je souhaite remercier, ensuite, Yannick MELINGE, et Robert LAFITE, qui ont accepté de juger mon travail de thèse et d'en être les rapporteurs. Vous avez consacré du temps à corriger mes erreurs, ou omissions et à approfondir les explications de certaines parties. Vos remarques pertinentes, critiques, et constructives, ont, je l'espère, permis de rendre plus cohérent ce manuscrit.

Je tiens à remercier chaleureusement les autres membres du Jury. Tout d'abord Monsieur le Professeur Vaclav SOBOLIK qui a bien voulu accepter d'en assurer la Présidence. Je remercie ensuite Philippe GOULLETQUER, sans lequel cette thèse n'aurait pu être financée ; j'ai apprécié, notamment, nos échanges à propos de l'ostréiculture, et de ses conséquences sur la sédimentation.

Parmi les membres du jury, je remercie Aldo SOTTOLICHIO et Pierre LE HIR d'avoir accepté de juger mon travail de thèse. Aldo, tu as été la première personne à me faire confiance. Je me souviens encore de tes premiers cours donnés en DEUG de Géologie, sur les modules de déformations des matériaux. Cela remonte à loin maintenant... Tu as accepté de nombreuses fois de me prendre en stage tout au long de mon parcours universitaire et j'ai

beaucoup appris et pris beaucoup de plaisir à faire ces études. Ces stages m'ont permis de développer des capacités dans des domaines qui n'étaient classiquement pas enseignés à l'Université de Bordeaux I. Tu as su m'encourager dans les moments de doute. Pour tout cela, je te remercie énormément. Pierre, j'ai vraiment apprécié le travail à ton contact. Chaque séjour à Brest a constitué une formidable opportunité d'améliorer mes connaissances des processus hydro-sédimentaires et de la modélisation numérique. Tu as toujours été disponible lorsque j'avais des questions à te poser ou bien lorsque j'avais une présentation à faire. Ton esprit fertile a été pour moi une source de motivation.

Je remercie aussi, chaleureusement, l'équipe du LER/PC Ifremer de l'Houmeau et de la Tremblade avec qui j'ai partagé de nombreux moments et dont certains membres sont intervenus au cours de cette épopée : Je pense ainsi à Jean-Yves STANISIERE dont je garde un souvenir impérissable lors d'une sortie sur la vasière. Je retiens également nos longues discussions sur le fonctionnement de la baie ; Jean PROU, qui m'a donné les moyens humains et techniques qui m'ont aidés à mener à bien cette étude ; Olivier LE MOINE avec qui j'ai beaucoup travaillé sur l'ostréiculture et ses conséquences sur la sédimentation ; Stéphane GUESDON qui m'a laissé accéder à toute sa base de données des réseaux de mesures hydrologiques de la BMO ; Jean-Michel CHABIRAND et Philippe GEAIRON, que j'ai entraîné dans des randonnées sportives sur la vasière. Et je remercie surtout Jean-Luc SEUGNET, un pilote de grande classe sans qui la qualité des mesures hydro-sédimentaire n'aurait jamais pu être aussi bonne. Je garde beaucoup de souvenir à bord de Melosira ou d'Asléa, notamment une sortie en plein brouillard....Epique. Je n'oublie pas non plus les autres membres du laboratoire : Mireille RYCKAERT, Gérard THOMAS, Joëlle TRICOIRE, Annick DERRIEN, Sylvie MARGAT, Gabriel CHARPENTIER, Patrick SOLETCHNIK, Stéphane ROBERT, Jean-Louis GAIGNON, Anne SCHMIDT, Bénédicte CHARRIER. Mais aussi Alain FILLON, un vrai Geek et Rétha de surcroit, ainsi que James GRIZON, dont les St-Jacques ont égayé mes papilles durant plusieurs hivers.

Un grand merci également au personnel de l'équipe DYNECO/PHYSED Ifremer de Brest, qui m'a accueilli et conseillé sur les Altus : Philippe BASSOULLET, Florence CAYOCCA, Hervé JESTIN. Mais je remercie surtout Romaric VERNEY, que j'ai souvent, voire très souvent, appelé pour des problèmes sur Matlab. J'ai peut-être abusé de ton temps par moments, mais tu as toujours été patient et pédagogue avec moi. Vraiment un grand merci pour tout cela. Je ne peux pas non plus oublier mon homonyme Youen KERVELLA, que j'ai souvent perturbé dans son travail en l'appelant des fois pour rien, mais souvent pour parler routines MATLAB, présentations ou articles. Je te remercie également de m'avoir accueilli chez toi. Concernant tes frayeurs lors de sorties en mer avec moi, je trouve cela un peu exagéré...t'es breton ou pas ??? Sinon tu as raison, il faudrait quand même que l'on finisse l'article KERVELLA & KERVELLA...

Enfin je n'oublie pas que j'ai fait également parti d'une équipe pluridisciplinaire au début de ma thèse, et c'est avec grand plaisir que je remercie les membres de l'ex-CRELA/CREMA pour leur aide, ou bien simplement pour les moments passés ensemble : Pierre Guy SAURIAU, Françoise MORNET, Martine BRERET, Nicolas LACHAUSSEE, Marie CHIVAILLE, Arnaud CHRISTOPHE, Yves DESCATOIRE, Didier LEGUAY, Michel PRINEAU, Evelyne TRAVERS et surtout Philippe PINEAU qui a très souvent mis la main à la vase, et Lucette JOASSARD qui a passé de nombreuses heures à faire des analyses granulométriques..

Au cours de cette thèse, j'ai également côtoyé d'autres personnes venant de laboratoires différents. Je remercie donc Michel CREMER, Olivier WEBER, Jean-Marie JOUANNEAU et Joël SAINT-PAUL, du laboratoire EPOC de l'université de Bordeaux I, pour les analyses des carottes sédimentaires. Je remercie également Isabelle BRENON de l'équipe DPL du laboratoire LIENS de l'université de La Rochelle, pour les nombreuses discussions que nous avons eu. Je tiens aussi à remercier Damien PHAM VAN BANG, du laboratoire hydraulique St-Venant de Chatou, pour les discussions scientifiques et non scientifiques que nous avons eu ensemble au Brésil. Je suis toujours épaté par ton aisance à faire des présentations en anglais. Mais ce que je retiens, surtout, c'est la vitesse à laquelle tu arrives à comprendre un problème. Je remercie aussi Anne BOIRON du laboratoire RH Ifremer de l'Houmeau, pour les moments de détente lors des sardines parties de Jean-Jacques VAYNE et des nombreux repas que nous avons partagés. Je ne peux oublier, aussi, Brigitte HUDELAINÉ, et Jennifer DE LA CORTE, de l'Ecole Doctorale de la Rochelle.

Encore un grand merci à tous les doctorants, que j'ai côtoyé pendant 3 ans : Eric DURIEUX (Keep it real !!), François PATICAT (forces pas sur les polos moulants), Benoit LEBRETON (Paillettes – Boule à facettes), Vincent BOUCHEZ (Rugby 4 ever), Christine COUTURIER (My English teacher), Tarek DAOUK (Change rien surtout), Sandie MILLOT (Pilier de bar... → Dicentrarchus Labrax !!), Natalie MALLET (faiseuse de sucre pour fêtard fatigué), Caroline TESSIER (le calme incarné), Aymeric JOUON (Brazilian time), Emilie STRADY (Fan de Heavy Metal !!) et Florian GANTHY (Herbus master).

J'aurai également une pensée pour Leonardo VELOSO DARDENGO, étudiant brésilien en thèse d'océanographie à Toulouse et passager du vol AF 447 Rio-Paris), que j'avais rencontré lors du congrès, au Brésil.

Merci à tous les potes qui sont venu me soutenir, et surtout faire la fête, lors de la soutenance, Gros Ed, Gros Jul, Gros Taillo, Moustik, la Loose, Jacky, Ragondin, Ben (qui a une coiffure de moniteur de Hobby Cat). Une pensée pour les autres qui ont suivi tout ça de loin : Gros Raf, NikooO, Mathieu, Thomas, Rémi, Vincent, Julian, Moug'z, Arnaud, Franky, Elise, Ricou, le Brice, Tonio, Vivi, Manu, Aurélie.

Et puis un grand merci à toute ma famille, mes parents, ma grand-mère, mon frère, mes sœurs, mon beau-frère et ma belle sœur, mon oncle, tout le monde quoi...! ainsi que les Bénazéra (ils pourraient être de la famille que ce serait pareil) pour m'avoir soutenu, supporté et surtout aidé tout au long de mes études. La famille, c'est tout ce qu'il y a de plus important.

Enfin pour clore cette longue liste, un énorme merci à la personne la plus chère à mes yeux, Magali, qui a supporté beaucoup de choses depuis trois ans : mes mauvaises humeurs sur la fin (je sais que tu as passé des vacances horribles en septembre pendant que je finissais de rédiger) ; l'éloignement, les absences, etc.... Cette thèse est un peu la tienne...

LISTE DES SYMBOLES

c : concentration massique (kg/m^3)
 C_{TKE} : constante (= 0,19)
 E : flux d'érosion (kg/m^3)
 D : flux de dépôt (kg/m^3)
 f : fréquence (Hz)
 f_w : coefficient de frottement des vagues sur le fond
 G : module d'élasticité (Pa)
 h : hauteur de la colonne d'eau (m)
 H : hauteur des vagues (m)
 H_s : hauteur significative des vagues (m)
 H_{rms} : hauteur moyenne des vagues (m)
 K : énergie cinétique turbulente (m^2/s^2)
 k : nombre d'onde
 k_g : rugosité de grain (m)
 k_r : rugosité de ride (m)
 k_h : rugosité de forme (m)
 k_m : rugosité induite par le mouvement du sédiment (m)
 L : longueur d'onde (m)
 L_e : longueur caractéristique de l'écoulement
 M_e : masse de l'eau dans l'échantillon (kg)
 M_s : masse solide de l'échantillon (kg)
 M_t : masse totale de l'échantillon (kg)
 m_0 : variation de la hauteur de la surface libre (m)
 R : taux de sédimentation linéaire (cm.an^{-1})
 Re : nombre de Reynolds
 r : taux de sédimentation massique ($\text{g.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$)
 S : salinité
 SNR : rapport signal sur bruit de l'ADV (dB)
 S_p : densité spectrale de pression
 S_{uv} : densité spectrale des composantes de la vitesse horizontale
 T : température ($^{\circ}\text{C}$)
 T_m : période moyenne des vagues (s)
 T_p : période de pic des vagues (s)
 T_r : période représentative des vagues (s)
 T_z : période par le passage au niveau moyen des vagues (s)
 U : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s)
 U_{br} : vitesse orbitale des vagues (m/s)
 u : vitesse instantanée de l'écoulement (m/s)
 u^* : vitesse de frottement au voisinage du fond (m/s)
 u^{*e} : vitesse d'entraînement au fond des particules (m/s)
 u, v, w : composantes horizontales et verticales de la vitesse instantanée de l'écoulement (m/s)
 u', v', w' : composantes horizontales et verticales de la vitesse turbulente de l'écoulement (m/s)
 V_i : volume de l'élément (L)
 V_t : volume total de l'échantillon (L)
 W : teneur en eau massique (%)
 z_0 : longueur de rugosité du sédiment de surface (mm)

Lettres grecques :

- β : pente de l'estran ($^{\circ}$)
 ρ : masse volumique de l'eau (kg/m^3)
 ρ_s : densité solide (= 2,65)
 ρ_h : densité humide (kg/m^3)
 ρ_s : densité sèche (kg/m^3)
 ϕ : fraction volumique solide
 ϕ_f : fraction volumique solide des vases
 ϕ_i : fraction volumique d'un élément solide, eau ou gaz
 ϕ_m : concentration d'entassement maximale
 ϕ_s : fraction volumique des grains
 ϕ_c : concentration critique
 $\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement (s^{-1})
 φ_z : porosité à la profondeur z
 φ_0 : porosité en surface
 η : viscosité relative de la suspension (Pa.s)
 λ : constante radioactive de l'isotope (s)
 μ : viscosité apparente (Pa.s)
 μ_0 : viscosité (Pa.s)
 ν : viscosité cinématique de l'eau ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
 τ : contrainte de cisaillement imposée au fluide (Pa)
 τ_b : tension de cisaillement sur le fond (N/m^2)
 τ_c : tension de cisaillement due aux courants (N/m^2)
 τ_{ce} : tension critique d'érosion (N/m^2)
 τ_{cd} : tension critique de dépôt (N/m^2)
 τ_d : tension de dépôt (N/m^2)
 τ_e : tension d'érosion (N/m^2)
 τ_{\log} : tension de cisaillement déterminée par le profil logarithmique (N/m^2)
 τ_{lw} : tension de cisaillement due aux vagues longues (N/m^2)
 τ_{sw} : tension de cisaillement due aux vagues courtes (N/m^2)
 τ_{TKE} : tension de cisaillement calculée à partir de l'énergie cinétique turbulente (N/m^2)
 τ_{viscous} : tension de cisaillement due aux forces visqueuses (N/m^2)
 τ_w : tension de cisaillement due aux vagues (N/m^2)
 τ_{wc} : tension de cisaillement due aux vagues et aux courants (N/m^2)
 τ_y : seuil d'écoulement (Pa)
 τ_{y0} : seuil d'écoulement du fluide interstitiel à une teneur en eau donnée (Pa)
 ω : pulsation (rad.s^{-1})

Sommaire

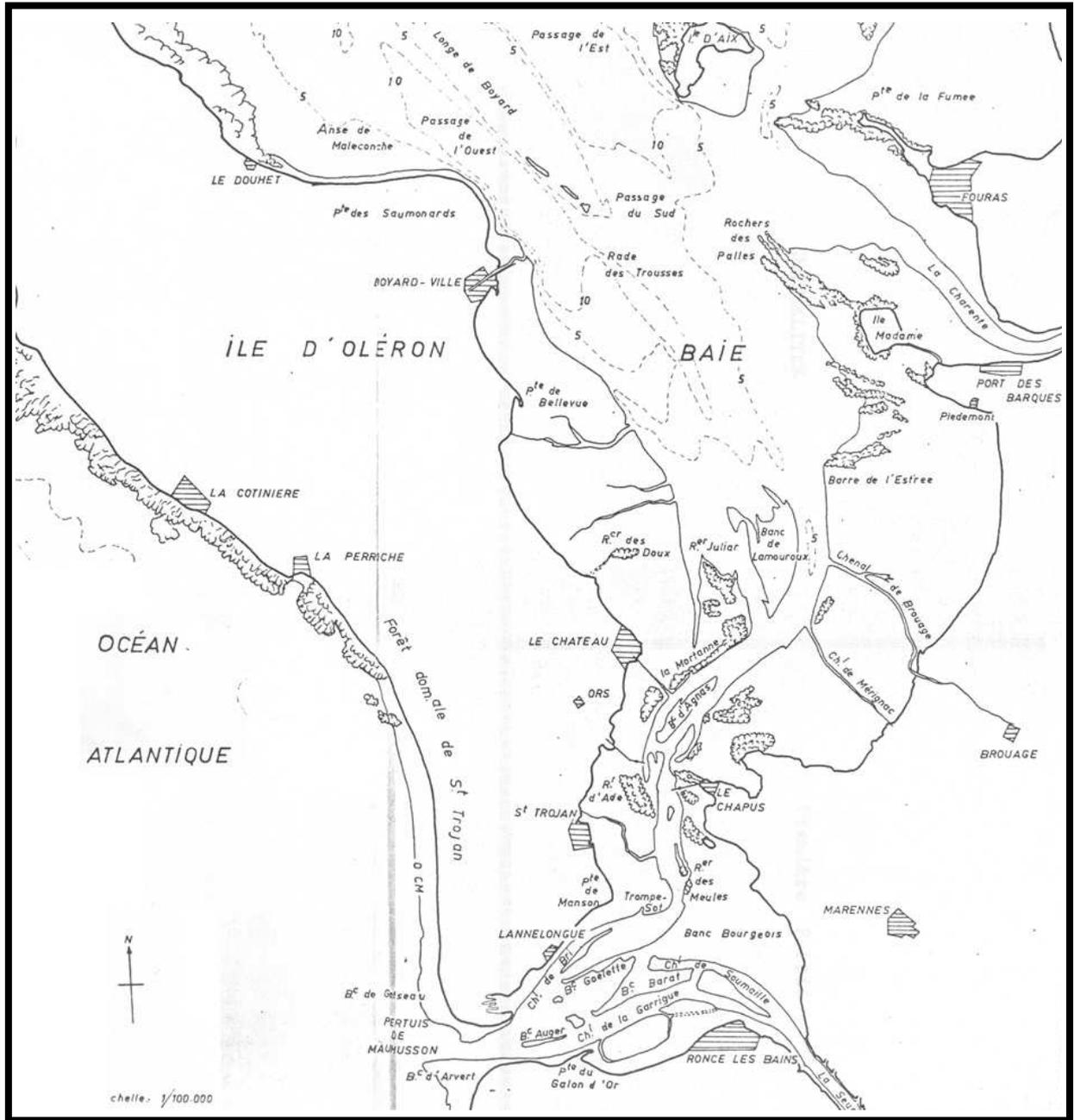
INTRODUCTION	9
PARTIE I : CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DES SEDIMENTS EN ZONES INTERTIDALES	15
I-1. INTRODUCTION	16
I-2. DEFINITION DES SEDIMENTS	17
I-2.1. SEDIMENTS GROSSIERS	17
I-2.2. SEDIMENTS FINS	17
I-2.3. SEDIMENTS MIXTES	17
I-3. ETATS DES SEDIMENTS EN MILIEU AQUATIQUE	18
I-4. COMPORTEMENTS RHEOLOGIQUES DES SEDIMENTS EN SUSPENSION .	19
I-4.1. FLUIDES NEWTONIENS	19
I-4.2. FLUIDES NON-NEWTONIENS	21
I.4.2.2. <i>Fluides rhéofluidifiants ou rhéoépaississants</i>	21
I.4.2.3. <i>Fluides à seuil</i>	22
I.4.2.4. <i>Fluides viscoélastiques</i>	22
I.4.2.5. <i>Fluides thixotropes</i>	23
I-5. DYNAMIQUE DES SEDIMENTS EN ZONES INTERTIDALES	23
I-5.1. ACTION EROSIVE DES VAGUES ET DES COURANTS SUR LES SEDIMENTS	23
I.5.1.1. <i>Courants et vagues</i>	23
I.5.1.2. <i>Dynamique de l'écoulement</i>	24
I.5.1.3. <i>Erosion des sédiments</i>	26
I-5.2. LIQUEFACTION DES SEDIMENTS	27
I-5.3. AUTO CONSOLIDATION OU TASSEMENT DES SEDIMENTS	28
I-5.4. AUTRES PARAMETRES MODIFIANT LA STABILITE D'UN SEDIMENT	28
5.4.1. <i>Modification d'origine intrinsèque au sédiment</i>	28
5.4.2. <i>Modifications d'origine biologiques</i>	29
5.4.3. <i>Modifications d'origine naturelle</i>	29
I-6. CONCLUSIONS	30
PARTIE II : LA BAIE DE MARENNES-OLERON	35
II-1. OBJECTIFS DE L'ETUDE	36
II-2. DEFINITIONS GENERALES DES BAIES	36
II-3. PRESENTATION DE LA BAIE DE MARENNES-OLERON	37
II-3.1. CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET SEDIMENTAIRE DE LA BAIE DE MARENNES- OLERON	37
II-3.1.1. <i>Morphologie de la baie</i>	37
II-3.1.2. <i>Couverture sédimentaire</i>	40

II-3.1.3. Taux de sédimentation.....	44
II-3.2. CONDITIONS METEO-OCEANIQUES ET HYDRODYNAMIQUES	44
II-3.2.1. Marée	45
II-3.2.2. Courants	45
II-3.2.3. Vents	47
II-3.2.4. Vagues (houles et clapots).....	48
II-3.3. CONCHYLICULTURE.....	49
II-3.3.1. Biomasse et répartition spatiale.....	49
II-3.3.2. Influence des huîtres sur la sédimentation	50
II-3.3.3. Influence des installations conchylocoles sur l'hydrodynamisme et la sédimentation	51
II-4. CONCLUSIONS	51
PARTIE III : STRATEGIE D'ETUDE	55
III-1. OBJECTIFS DE L'ETUDE	56
III-2. MATERIELS ET METHODES	57
III-2.1. ETUDE TEXTURALE ET STRUCTURELLE DES SEDIMENTS	57
III-2.1.1. Choix des sites d'étude.....	57
III-2.1.2. Stratégie d'échantillonnage	58
III-2.1.3. Analyse sédimentologique micro-granulométrique	60
III-2.1.4. Analyse radio-isotopique	61
III-2.1.5. Analyse rhéologique.....	63
III-2.2. ETUDE DES PARAMETRES HYDRO-SEDIMENTAIRES SUR LES ESTRANS.....	67
III-2.2.1. Description et localisation des sites d'étude	68
III-2.2.2. Mesures hydro-sédimentaires	70
III-2.2.3. Suivi de la matière en suspension, de la salinité et de la température	77
III-2.2.4. Caractéristiques des vents locaux au cours de l'étude hydro-sédimentaire.....	79
III-2.3. LE MODELE HYDROSEDIMENTAIRE SIAM-2DH	80
III-2.3.1. Emprise du modèle dans la baie de Marennes-Oléron.....	81
III-2.3.2. Implantation du modèle de transport de sédiment multiclasse.....	83
III-2.3.3. Les conditions de la simulation.....	84
III-2.3.4. Couplage des modules courantologique, de vague et de transport des sédiments (sable et vase).....	88
III-3. CONCLUSIONS.....	89
PARTIE IV : PHYSIQUE ET MECANIQUE DES SEDIMENTS SUPERFICIELS DE LA BAIE DE MARENNES-OLERON	93
IV-1. INTRODUCTION	94
IV-2. PRESENTATION DES RESULTATS DE LA CARACTERISATION PHYSIQUE ET MECANIQUE DES MATERIAUX	94
IV-2.1. TAILLE DES PARTICULES	94
IV-2.2. Teneur en eau des sédiments.....	98
IV-2.3. Seuil d'écoulement des sédiments	99
IV-3. INTERRELATION ENTRE LES PARAMETRES RHEOPHYSIQUES	101

IV-4. CARTES DE REPARTITION DE CES MATERIAUX SUR LES ESTRANS DE LA BAIE EN FONCTION DES SAISONS.....	109
IV-4.1. SITUATION ESTIVALE	110
III-4.2. SITUATION HIVERNALE.....	111
IV-5. CONCLUSIONS	112
PARTIE V : MECANISMES HYDRO-SEDIMENTAIRES SUR LES ZONES INTERTIDALES DE LA BAIE DE MARENNES-OLERON.....	117
V-1. INTRODUCTION.....	118
V-2. LITTORAL EST DE L'ILE D'OLERON.....	119
V-2.1. DESCRIPTION DES VAGUES	119
V-2.1.1. <i>Caractéristiques annuelles</i>	119
V-2.1.2. <i>Caractéristiques bimensuelles</i>	123
V-2.1.3. <i>Limitation de la hauteur des vagues</i>	125
V-2.2. MECANISMES SEDIMENTAIRES A L'ECHELLE SEMI-DIURNE.....	126
V-2.2.1. <i>En bas de l'estran</i>	126
V-2.2.2. <i>En haut de l'estran</i>	130
V-2.3. IMPACT DES VAGUES SUR LA STABILITE DES SEDIMENTS	131
V-2.3.1. <i>En bas de l'estran</i>	131
V-2.3.2. <i>En haut de l'estran</i>	133
V-2.4. VARIATIONS SEDIMENTAIRES ET ALTIMETRIQUES ANNUELLES AU DROIT DE CHAQUE STATION	135
V- 2.4.1. <i>Caractéristiques sédimentaires</i>	135
V-2.4.2. <i>Variations de la hauteur de l'interface</i>	137
V-3. VASIERE DE MONPORTAIL-BROUAGE.....	141
V-3.1. DESCRIPTION DES VAGUES	141
V-3.1.1. <i>Caractéristiques annuelles</i>	141
V-3.1.2. <i>Caractéristiques bimensuelles</i>	143
V-3.1.3. <i>Limitation de la hauteur des vagues</i>	145
V-3.2. PROCESSUS SEDIMENTAIRES A L'ECHELLE SEMI-DIURNE.....	146
V-3.2.1. <i>En bas de la vasière</i>	146
V-3.2.2. <i>En haut de la vasière</i>	149
V-3.3. IMPACT DES VAGUES SUR LA STABILITE DES SEDIMENTS	149
V-3.3.1 <i>En bas de la vasière</i>	150
V-3.3.2 <i>En haut de la vasière</i>	152
V-3.4. VARIATIONS SEDIMENTAIRES ET ALTIMETRIQUES ANNUELLES SUR LA VASIERE AU DROIT DE CHAQUE STATION	154
V-3.4.1. <i>Evolution des caractéristiques sédimentaires</i>	154
V-3.4.2. <i>Variations altimétriques de la surface et influence des apports de la Charente sur la sédimentation de la vasière de Monportail-Brouage</i>	155
V-.3.5. SEDIMENTATION SUR LE LONG TERME.....	159
V-3.5.1. <i>Enregistrement sédimentaire en bas de la vasière</i>	160
V-3.5.2. <i>Enregistrement sédimentaire en haut de la vasière</i>	161
V-4. CONCLUSIONS	163

PARTIE VI : INFLUENCE DE L’OSTREICULTURE SUR LA SEDIMENTATION D’UN BANC SABLEUX – CAS DU BANC DE LAMOUREUX	169
VI-1. INTRODUCTION	170
VI-2. CONSEQUENCES DE LA PRESENCE DES TABLES OSTREICOLES SUR LA SEDIMENTATION	171
VI-2.1. MODIFICATIONS SEDIMENTAIRES ET EVOLUTION VERTICALE DE L’INTERFACE EN RELATION AVEC LA PRODUCTION DES HUITRES	171
VI-2.1.1. <i>Modifications sédimentaires</i>	171
VI-2.1.2. <i>Evolution de la hauteur des sédiments</i>	173
VI-2.2. EVALUATION DES DEPOTS GENERES PAR LES HUITRES	174
VI-3. IMPACT DES TEMPETES SUR LA STABILITE DES BIO-DEPOTS	177
VI-3.1. CARACTERISTIQUES DES TEMPETES	178
VI-3.2. FORÇAGES SUR LE BANC ET REPNSES DE L’INTERFACE SEDIMENTAIRE	180
VI-3.2.1. <i>Observations à l’échelle de la tempête</i>	180
VI-3.2.2. <i>Observations à l’échelle des vagues</i>	182
VI-4. EVOLUTION MORPHO-SEDIMENTAIRE PLURIANNUELLE DU BANC... 184	
VI-4.1. SEDIMENTATION A MOYEN TERME	184
VI-4.2. EVOLUTION DES VOLUMES SEDIMENTAIRES ENTRE 2005,2007 ET 2008.....	185
VI-4.3. ORIGINE DES EVOLUTIONS MORPHO-SEDIMENTAIRES	188
VI-5. CONCLUSIONS.....	190
PARTIE VII : APPLICATIONS DU MODELE HYDRO-SEDIMENTAIRE SIAM-2DH EN BAIE DE MARENNES-OLERON	195
VII-1. INTRODUCTION.....	196
VII-2. VALIDATION DU MODELE DE HOULE : CAPACITE DU MODELE A REPRODUIRE LES CONTRAINTES DE FOND INDUITES PAR LES VAGUES ... 196	
VII-2.1. VARIABILITE SPATIALE DES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT DES VAGUES SUR LE FOND SIMULEES	198
VII-2.2. COMPARAISON DES CONTRAINTES DE FOND INDUITES PAR LES VAGUES	199
VII-2.2.1. <i>Comparaison sur une période de 12 mois</i>	199
VII-2.2.2. <i>Comparaison sur des événements tempétueux caractéristiques</i>	202
VII-2.3. SYNTHESE.....	207
VII-3. CALIBRAGE ET VALIDATION DU MODELE SEDIMENTAIRE	207
VII-3.1. CALIBRAGE DU MODELE DE TRANSPORT EN SUSPENSION	207
VII-3.2. VARIABILITE SPATIALE DE LA TURBIDITE SIMULEE	209
VII-3.3. VALIDATION DU MODELE DE TRANSPORT EN SUSPENSION	210
VII-3.3.1. <i>Périodes avec vagues (banc d’Agnas)</i>	211
VII-3.3.2. <i>Périodes sans vagues</i>	213
VII-3.4. SYNTHESE.....	218
VII-4. ANALYSE DES RESULTATS DE LA MODELISATION HYDRO-SEDIMENTAIRE APPLIQUEE AU BASSIN DE MARENNES-OLERON.....	219
VII-4.1. COMPARAISON DES REPARTITIONS DES FRACTIONS VASE EN SURFACE	219

VII-4.2. IDENTIFICATION DES ZONES A FORTE ET FAIBLE MOBILITE	223
VII-4.3. INFLUENCE DE L'OSTREICULTURE SUR LA SEDIMENTATION DANS LA BAIE	224
VII-4.3.1. <i>Sensibilité des variations altimétriques des sédiments à l'implantation des huîtres</i>	225
VII-4.3.2. <i>Variation de la fraction vaseuse dans la couche superficielle en présence et en l'absence des installations ostréicoles</i>	227
VII-4.3.3. <i>Effets des installations sur l'envasement des zones ostréicoles : cas du banc de Lamouroux</i>	229
VII-5. CONCLUSIONS	234
PARTIE VIII : SYNTHESE GENERALE - DISCUSSION	237
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	249
ANNEXES	255
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX.....	267
REFERENCES	281



Cartographie et dénomination des principaux bancs de sables, rochers et villages de la baie de Marennes-Oléron

Introduction

Compte tenu de l'intense utilisation des espaces littoraux (densification de la population et des aménagements, augmentation des activités professionnelles et touristiques, etc.) et de leurs modifications sensibles liées aux variations du niveau marin, leurs études représentent un atout aussi bien écologique qu'économique. Leur gestion doit ainsi considérer la configuration de chaque site et ses caractéristiques, conformément aux objectifs de protection de l'écosystème, en favorisant la création d'une activité économique intégrée au milieu naturel (Paskoff, 2004). Les aménagements indispensables pour l'ensemble des usages devraient être conçus en intégrant tous ses aspects environnementaux, notamment celui sédimentaire.

La baie de Marennes-Oléron présentant un intérêt socio-économique évident en lien avec des activités diverses, telles que les activités conchylicoles, le tourisme, la pêche côtière, les aménagements et la protection du littoral, les installations portuaires, l'impact des dragages et de leurs rejets, l'entretien des voies navigables, son environnement sédimentaire mérite d'être étudié en détails et suivi pour sa préservation.

Les zones intertidales charentaises (au sens large : « *flat* ») sont des sites où la sédimentation est importante. Elles résultent des apports océaniques et continentaux (marais poitevin, fleuve Charente et estuaire de la Gironde), mais également de la biodéposition générée par les huîtres et les moules. Ces organismes provoquent une sédimentation locale (Martin *et al.*, 1989; Sornin, 1981; Sornin, 1982), du fait de l'expulsion de particules agglomérées, que sont les fèces et les pseudo-fèces. Les installations conchylicoles (huîtres et moules) dans la baie de Marennes-Oléron occupent environ 25% des zones intertidales et la question de leur impact sur la sédimentation correspond à une préoccupation forte de la part des collectivités locales, des professionnels de la mer (conchyliculteurs et pêcheurs) mais également des communautés scientifiques en charge de ces problèmes. Le microphytobenthos, notamment, du fait de sa sécrétion d'exopolysaccharides (EPS) à marée basse, contribue également, mais de manière relativement secondaire, à la stabilisation des sédiments, tandis que l'influence bioturbatrice de la macrofaune benthique, du fait de son comportement trophique ou de la constitution de son habitat, peut jouer un rôle non négligeable dans les processus d'érosion.

Pendant longtemps, la connaissance scientifique de la baie reposait, soit sur des études géographiques anciennes (Regrain, 1980 ; Verger, 1968), soit sur des études sédimentologiques globales (Baruseau, 1973 ; Gouleau, 1975 ; Hily, 1977 ; Masson, 1973; Pouliquen, 1975 ; Tesson, 1973), auxquelles s'ajoutent des travaux concernant des zones localisées (extrémités de la baie et pertuis, coureau d'Oléron, banc Lamouroux, partie sud de la baie, etc.). Des travaux relatifs à l'étude des processus sur des sédiments cohésifs en baie de Marennes-Oléron ont été régulièrement entrepris (Castaing, 1981 ; Gouleau, 1975; Migniot, 1968 ; Migniot, 1977 ; Migniot, 1982; Sornin, 1981 ; Sornin, 1982 ; Sornin *et al.*, 1983), ainsi que quelques études hydrodynamiques à moyenne échelle spatiale (Leclerc *et al.*, 1976).

Après une période d'une dizaine d'année sans études sédimentaires développées, des travaux de caractérisation morphosédimentaire, concernant essentiellement la vasière de Monportail-Brouage, ont été initiés par l'ex CREMA (Ifremer-CNRS) dans le cadre du programme européen MAST3/INTRMUD, à partir de 1993. Ce programme regroupait des études sur les aspects relatifs aux variations spatio-temporelles « *cross-shore* » (Germaneau et

Robert, 1994 ; Germaneau et Robert, 1995 ; Germaneau et Sauriau, 1994 ; Jarousseau, 1997; Legeron, 1994 ; Robert *et al.*, 1997 ; Robert et Gouleau, 1999 ; Sauriau *et al.*, 1997 ; Sauriau *et al.*, 1989), sur les caractéristiques de la sédimentation vaseuse à long terme (Gouleau *et al.*, 2000) ainsi que sur les évolutions morphodynamiques des systèmes de drainage par suivi cartographique et modélisation morphodynamique quantitative (Blard, 2001; Maurin *et al.*, 2003).

En parallèle, à partir de 1998, des études ont été menées afin de comprendre et caractériser les processus hydro et bio-sédimentaire ainsi que les interactions entre ces processus, sur la vasière de Monportail-Brouage (au sens strict : « *mudflat* »). Ainsi, les principaux forçages hydrodynamiques responsables des mouvements des sédiments fluides, ont été déterminés par Bassoulet *et al.* (2000). Ces informations ont été utilisées par Le Hir *et al.* (2000) pour réaliser la modélisation de la remise en suspension sur la vasière. D'un point de vue biologique, les effets du benthos sur la stabilité des vases ont été étudiés (Orvain, 2002; Orvain *et al.*, 2007 ; Orvain *et al.*, 2004), ainsi que les relations entre les effets (dé)stabilisateurs du benthos et le comportement mécanique des vases, par approche rhéologique (Combe *et al.*, 2003 ; Robert *et al.*, 2001).

Malgré toutes ces études, les connaissances morpho-sédimentaires et hydrodynamiques des zones intertidales de la baie restent pour le moins fragmentaires. Les résultats obtenus sur la vasière de Monportail-Brouage ne sont pas extrapolables sur les autres parties de la baie. Par ailleurs, la réorganisation géographique des zones d'élevages au cours des dernières décennies (restructurations du cadastre conchylicole dans le Domaine Public Maritime) a rendu difficile l'exploitation des données antérieures. Ainsi, toute expertise actuelle (et encore moins prédictive) est limitée en matière d'évolution des mouvements sédimentaires, à court et moyen terme, affectant les estrans de la baie.

L'objectif de cette étude est d'analyser et de comprendre la dynamique sédimentaire des zones intertidales du bassin. Elle s'intègre dans différents programmes régionaux (CPER) et nationaux (notamment PNEC concernant le fonctionnement des baies). En effet, plusieurs questions fondamentales se posent :

- *Quels sont les différents types de sédiments, d'un point de vue de leur nature texturale et de leur comportement mécanique, des zones intertidales de la baie ?*
- *Comment se répartissent les faciès sédimentaires sur les estrans ?*
- *Quelles sont les variations saisonnières de ces faciès sous les actions naturelles (météorologie, hydrodynamique) et anthropiques (conchyliculture) ?*
- *Quelle est l'influence relative des forçages, courants et vagues, sur la mise en mouvement des sédiments ?*
- *Quels sont les impacts des activités conchylicoles sur la sédimentation ?*
- *Quelles sont les zones intertidales à forte et faible mobilité et vers quelle situation (accrétion, stable, érosion) évoluent telles ?*

Pour y répondre, il a été adopté une stratégie d'étude combinant différentes échelles spatio-temporelles de prélèvements sédimentaires analysés en laboratoire et de mesures hydro-sédimentaires *in situ*.

Afin de caractériser les sédiments superficiels, il a été décidé d'étudier en laboratoire, leur nature texturale et leur comportement mécanique à partir d'une importante campagne d'échantillonnage, mise en œuvre à des saisons contrastées. Cette approche doit permettre

l'établissement de cartes sédimentaires saisonnières détaillées des zones intertidales, basées sur le comportement mécanique, afin de compléter les cartes existantes (Hily, 1977; Weber, 2004). Ce type de cartes est très important car la nature sédimentaire des fonds marins conditionne les habitats benthiques et les biocénoses qui s'y développent.

En parallèle, une campagne de mesures *in situ* basée sur l'utilisation conjointe d'altimètres autonomes, de courantomètre et de sondes de turbidité permet d'identifier des forçages hydrodynamiques et des variations de la hauteur du sédiment induites. Un suivi mensuel des caractéristiques sédimentaires de l'interface et la collecte en fin de période de plusieurs carottes complètent l'investigation. L'analyse de l'ensemble de ces mesures permettra de mieux comprendre les processus naturels et anthropiques qui interviennent dans les différentes zones de la baie.

Cette campagne de mesures *in situ* a également pour objectif de fournir des informations permettant le calage des données nécessaires à l'utilisation du modèle hydro-sédimentaire SIAM-2DH, développé par l'Ifremer, appliqué à la baie de Marennes-Oléron. Cet apport permettra d'améliorer les simulations faites pour extrapoler à l'ensemble des estrans de la baie, tout en restant vigilant sur les coïncidences entre les résultats des mesures et ceux du calcul numérique.

Cette thèse s'articule en 8 parties :

Une synthèse sur la dynamique intertidale des sédiments grossiers, fins et mixtes est proposée. L'accent sera mis sur l'influence des forçages hydro-sédimentaires sur l'interface et sur le comportement mécanique des sédiments, notamment au travers de la détermination des contraintes de cisaillement globale des sédiments et des contraintes de frottement générées par les courants et les vagues sur le fond. (*partie I*)

Un état des connaissances de la baie, concernant sa morphologie, les faciès sédimentaires rencontrés, l'hydrodynamisme et les installations conchylicoles, est dressé. Cette analyse bibliographique permet de montrer les carences qui existent sur la compréhension de la dynamique sédimentaire des estrans de la baie. (*partie II*)

Cette partie présente la stratégie d'étude, couplant une étude sédimentologique, une étude hydrodynamique et l'utilisation de la modélisation hydro-sédimentaire, ainsi que la localisation des appareils de mesures *in situ* et les données utilisées dans le cadre de cette thèse. L'accent est mis sur l'influence des forçages hydro-sédimentaires sur l'interface et sur le comportement mécanique des sédiments, notamment au travers de la détermination des contraintes de cisaillement des sédiments et des contraintes de frottement générées par les courants et les vagues sur le fond. L'implantation du modèle hydro-sédimentaire SiAM-2DH, appliqué à la baie, est également décrite. (*partie III*)

Les résultats des analyses sédimentologiques et rhéophysiques sont présentés et analysés, afin de déterminer les relations qui existent entre le seuil d'écoulement, la nature texturale et la concentration des sédiments. A partir de la localisation des échantillons analysés et des observations faites sur le terrain lors des prélèvements, des cartes des sédiments superficiels des zones intertidales sont présentées. (*partie IV*)

Les résultats des mesures hydrodynamiques et sédimentaires, réalisées sur la partie occidentale de la baie et sur la vasière de Monportail-Brouage, sont analysés. Les forçages

hydrodynamiques et les processus hydro-sédimentaires, suivant plusieurs échelles temporelles, sont longuement décrits et quantifiés. (*partie V*)

L'influence de l'ostréiculture sur la nature des sédiments de surface et sur les variations altimétriques de l'interface, au niveau du banc de Lamouroux est évaluée. (*partie VI*)

Après un nouveau calage du modèle de transport SiAM-2DH prenant en compte les résultats expérimentaux, des simulations, incluant ou non les installations ostréicoles sont réalisées. L'analyse des résultats permet d'apprécier, à l'échelle des estrans de la baie, l'influence des activités ostréicoles sur la sédimentation. (*partie VII*)

Une synthèse générale résume et souligne les nombreux résultats apportés par les différentes approches en les discutant. (*partie VIII*)

La conclusion générale rassemble les points majeurs de cette étude pluridisciplinaire et ouvre des perspectives de recherche.

Partie I : Considérations générales sur la dynamique sédimentaire des sédiments en zones intertidales

I-1. Introduction

La dynamique sédimentaire en milieu littoral fait intervenir de nombreux facteurs physiques, hydrodynamiques et anthropiques interagissant avec les mécanismes sédimentaires (érosion – dépôt - transport). La figure I-1 illustre leurs effets sur le milieu littoral.

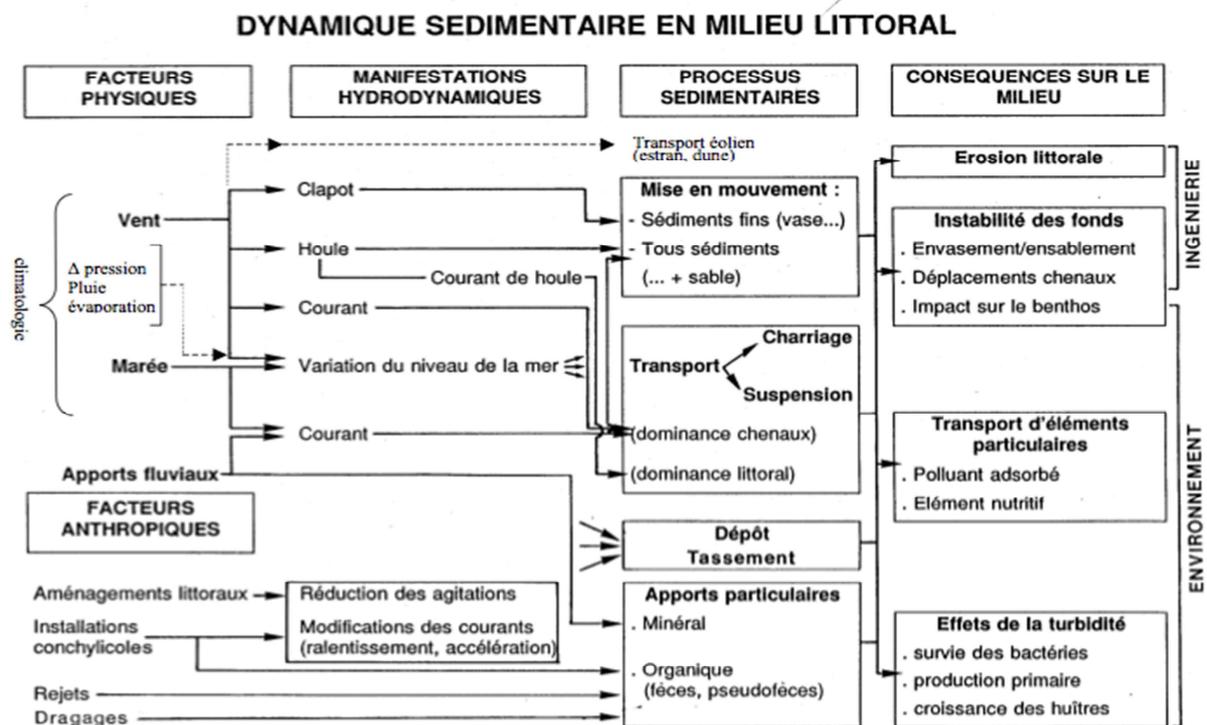


Figure I-1 : Schéma synthétique des processus et des forçages sur l'évolution des zones côtières (d'après Le Hir, 2008)

Les mécanismes d'érosion et de dépôt des sédiments superficiels en zones intertidales sont complexes du fait de la grande diversité des faciès rencontrés (nature minéralogique, taille, forme, densité et état structural), de l'éloignement des sources d'approvisionnement en matériaux (d'origine estuarienne ou résultant de l'érosion littorale), des phénomènes physico-chimiques (pH, salinité, matière organique, oxydoréduction), de l'influence de l'homme (dragage, conchyliculture, batillage), mais également de l'exposition des zones intertidales aux forçages hydrodynamiques (vague, courant), qui agissent à différentes échelles spatio-temporelles.

Cette partie sur l'état de l'art est structurée en 4 chapitres qui traitent de :

- La définition des sédiments
- Les différents états des sédiments en milieu aquatique
- Les comportements rhéologiques des sédiments en suspension
- La dynamique des sédiments en zone intertidale

I-2. Définition des sédiments

I-2.1. Sédiments grossiers

Les sédiments grossiers, granulaires ou non cohésifs, sont constitués de galets, graviers, sables ou sablons, d'une taille supérieure à 63 ou 50 μm suivant les classifications et présentent des formes variables, allant de formes sphériques à des formes allongées. En règle générale, il n'y a pas de cohésion entre les particules grossières. Les interactions entre les particules sont dominées par les forces de contact et par l'espace interparticulaire. Il est possible que pour les plus petites particules, de petites charges leur confèrent des propriétés identiques aux particules plus fines et développent une légère cohésion. A l'émersion, les sédiments grossiers présentent une cohésion capillaire due à la tension superficielle des grains humides.

I-2.2. Sédiments fins

Les sédiments fins sont généralement composés d'un mélange d'argiles, de limons, de sables fins, de matière organique et d'eau minéralisée (sels, chlorures, etc.). Ces particules, qui sont responsables de la cohésion de l'ensemble, possèdent des forces inter-particulaires qui créent des liaisons plus ou moins fortes entre elles. Sous l'action des processus de flocculation, des particules fines en suspension dans la colonne d'eau peuvent s'agréger. Ces floccs présentent des tailles variables (Eisma et Li, 1993 ; Manning, 2004), dépendant de l'agitation, des collisions et de la cohésion des particules.

La fraction minérale peut être constituée de matériaux d'origine détritique (quartz, minéraux lourds et argiles) et d'origine biologique ou chimique (chlorures, sulfates, phosphates, carbonates et silicates) (Bellair et Pomerol, 1984). Les particules d'une taille inférieure à 2 μm (argiles) sont très importantes vis à vis du comportement mécanique des sédiments. La fraction colloïdale joue un rôle important en milieu fortement turbide, comme dans les estuaires (Holtz et Kovacs, 1981).

La fraction organique peut être d'origine autochtone ou allochtone. La partie autochtone provient de la production phytoplanctonique (Meybeck, 1982), macrophytique ou encore provenant d'organismes morts. La partie allochtone vient du lessivage des sols des bassins versants, des rejets domestiques, des activités industrielles et agricoles, mais aussi des poussières transportées par les airs. En milieu marin, les principaux composés organiques sont les polysaccharides, les protéines, les lipides, les nutriments, les hydrocarbures, les acides humiques et fulviques (Berner, 1980). Les polysaccharides et les protéines, sécrétés par le zooplancton, le phytoplancton ou bien par les bactéries, possèdent des pouvoirs flocculants. Ils peuvent former des structures, sous forme de biofilms, de plusieurs centaines de microns (Passow *et al.*, 2001).

I-2.3. Sédiments mixtes

Les sédiments mixtes constituent un mélange de particules fines (vases) et de particules plus grosses (sables). Ce type de sédiments se retrouve dans de très nombreux

environnements côtiers (exemples en France : baie de Marennes-Oléron, Grande Vasière du golfe de Gascogne, baie du mont St-Michel, baie des Veys, embouchure de la Seine, etc.). Selon leur degré d'exposition aux différents forçages hydrodynamiques (courants et vagues), ils se présentent sous la forme de vrais mélanges de sables et de fines ou bien sous la forme de couches alternées de sables et de vase, d'épaisseurs variables.

I-3. Etats des sédiments en milieu aquatique

En milieu aquatique, les particules fines contenues dans la colonne d'eau et dans l'interface sédimentaire sont plus ou moins concentrées et présentent plusieurs états.

Dans la colonne d'eau, les sédiments sont fortement dilués et constituent une suspension faiblement concentrée. Les particules peuvent interagir entre elles par des forces colloïdales qui résultent de la combinaison des forces de van der Waals, des forces électrostatiques et des effets stériques (liés à l'adsorption de polymères). Lorsque les forces d'attraction sont suffisamment importantes, les particules peuvent être attirées les unes vers les autres, il y a alors agrégation (formation de floes) et floculation progressive. Ces suspensions sont souvent assimilables à des fluides newtoniens et ne présentent pas de résistance au cisaillement.

L'interface sédimentaire est définie lorsque la concentration en particules de la suspension devient suffisamment importante pour qu'un réseau connecté se forme sous l'effet des forces d'interactions électrostatiques importantes. L'écoulement ou l'érosion de ces suspensions intervient lorsqu'une contrainte (ou une force) supérieure à la contrainte seuil (τ_y), ou seuil d'écoulement caractérisant la résistance au cisaillement du réseau de particules, est appliquée.

L'enrichissement de l'interface en particules grossières provoque des modifications de sa structure et de sa cohésion. En fonction de la concentration en particules dans la suspension, on parlera de suspension « molle » ou de suspension « dure » :

1. Une suspension « molle » correspond à un mélange entre une phase fluide (vase) et des inclusions non miscibles (sable) dans ce fluide et est caractérisée d'une part par sa concentration (ou fraction) volumique solide (Φ) et d'autre part par sa concentration d'entassement maximale (Φ_m) correspondant au volume maximum de particules solides qui peuvent être intégrées dans le volume de ce fluide. Les effets de la distribution granulométrique des particules sont négligeables lorsque les concentrations en solide restent faibles ($\Phi < 20\%$). Au-delà de 20%, ces effets peuvent être importants. A l'échelle des particules, le fluide interstitiel s'apparente à un milieu continu, dans lequel les éléments de ce fluide sont très petits par rapport aux particules.

2. Il s'agit de suspensions « dures » ou suspensions granulaires, lorsque la distance entre deux particules est nulle (cas des sables en place, par exemple), avec un contact direct. La surface des particules est très souvent d'aspect rugueux à une échelle macroscopique, ce qui, en cas de contact direct, provoque l'enchevêtrement des rugosités. Les dissipations d'énergie sont plus grandes que celles résultant des mouvements du reste du fluide. Ce type de suspension est obtenu lorsque la concentration en solide dépasse la valeur critique de concentration Φ_c .

Les sédiments composant l'interface s'apparentent à des fluides non-newtoniens, présentant des seuils d'écoulement compris entre un et plusieurs centaines de Pa (Bassoulet et Hir, 2007 ; Rechlin, 1995 ; Van Craenenbroeck *et al.*, 1991).

I-4. Comportements rhéologiques des sédiments en suspension

Les sédiments présentent des caractéristiques de déformation, d'écoulement et de viscosité qui varient suivant leur composition, la taille des particules, leur concentration, etc. L'ensemble de ces caractéristiques détermine le comportement rhéologique du sédiment. L'étude rhéologique permet macroscopiquement de déterminer des lois comportementales (ou relations constitutives), qui rendent compte de la réponse mécanique de ce sédiment à une contrainte. Ces relations varient en fonction de la nature et de l'état du matériau. Les matériaux (comme les vases), dans leur état naturel, peuvent prendre divers aspects, d'un fluide quasi-newtonien à celui d'une pâte moyennement à fortement concentrée. Pour ces sédiments, il est possible d'appliquer des modèles rhéologiques simples pour des états bien définis. Classiquement on différencie les fluides « newtoniens » des fluides « non newtoniens ». Au regard de l'étude bibliographique, les travaux sur la rhéométrie des vases naturelles (Coussot, 1997 ; de Wit et Kranenburg, 1997 ; Khosrow, 1999 ; Migniot, 1968 ; Silva Jacinto, 2002) sont peu fréquents.

I-4.1. Fluides newtoniens

Le fluide newtonien est le plus simple que l'on puisse rencontrer dans la nature (eau, huiles). La loi de comportement d'un fluide visqueux est caractérisée par la proportionnalité entre les contraintes et la vitesse de déformation. La contrainte de cisaillement imposée au fluide (τ) est directement proportionnelle à la déformation du fluide cisailé ($\dot{\gamma}$). Pour un cisaillement simple, sa relation constitutive prend la forme : $\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$

Si le fluide ne contient pas de particules, il adopte un comportement newtonien, avec une viscosité μ_0 . L'ajout modéré de particules dans ce fluide provoque une augmentation de la viscosité apparente (μ), et du volume de la suspension (fig. I-2) qui est définie par

$$\mu = \frac{\mu_0}{(1 - \varepsilon / H)}$$
, avec H correspondant à l'épaisseur de la suspension et ε étant l'épaisseur cumulée des particules dans H.

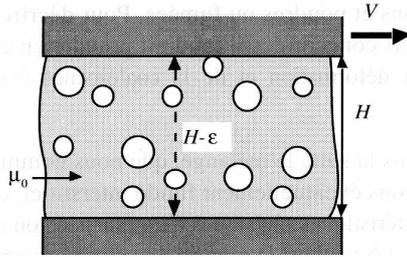


Figure I-2 : Effet fondamental de l'ajout de particules solides dans un fluide en première approximation : diminution de l'épaisseur moyenne cisailé (d'après Coussot et Ancey, 1999b)

La viscosité relative de la suspension ($\eta = \mu/\mu_0$) est dépendante de la concentration volumique et tend vers l'infini lorsque la concentration tend vers une concentration critique (assimilable à Φ_m) (fig. I-3). A partir de la formule d'Einstein (1956), $\mu = \mu_0 (1 + 2,5\phi)$, de nombreuses approches ont été proposées. Chong *et al* (1971) définissent la viscosité relative de la suspension en fonction de la concentration volumique, qui repose à partir des essais empiriques sur des solutions monodisperses (particules de même taille) et polydisperses (particules de tailles différentes) :

$$\eta = \left(1 + \frac{3}{4} \frac{\phi}{(\phi_m - \phi)} \right)^2 .$$

L'expression semi-empirique de Quesmada (1985), qui dérive de l'approche de Krieger-Dougherty (Krieger et Dougherty, 1959), prend pour hypothèse que chaque particule est entourée d'un fluide homogène dont la viscosité dépend uniquement de la concentration en particules et de la viscosité du fluide interstitiel. Il en ressort l'expression suivante :

$$\eta = \left(1 - \frac{\phi}{A} \right)^{-\alpha} ,$$

où α est un paramètre (généralement, $\alpha = 2$), et $A = 1$. Ces deux formules, ainsi que la plupart de celles qui existent, prédisent des valeurs de viscosité assez proches.

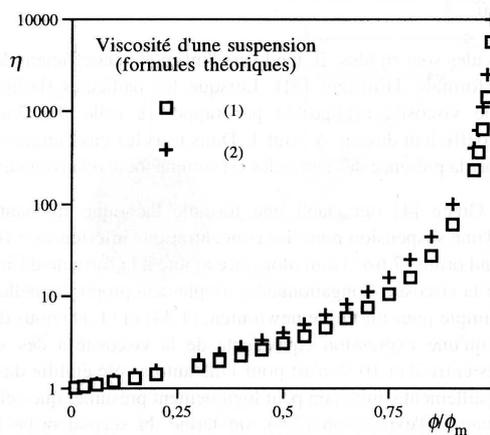


Figure I-3 : Comparaison de la viscosité d'une suspension de particules non colloïdales d'après deux formules typiques en fonction de la concentration d'entassement maximale : (1) Formule de Chong *et al.* (1971) ; (2) Formule de Quesmada (1985) (d'après Coussot et Ancey, 1999b)

I-4.2. Fluides non-newtoniens

Les fluides non-newtoniens sont caractérisés par une perte de linéarité de la relation entre les contraintes et la vitesse de déformation. En fonction de leur comportement, ils sont qualifiés de fluides rhéofluidifiants, rhéoépaississants, viscoélastiques, à seuil et/ou thixotropes (fig. I-4). Les lois de comportement sont plus complexes à déterminer.

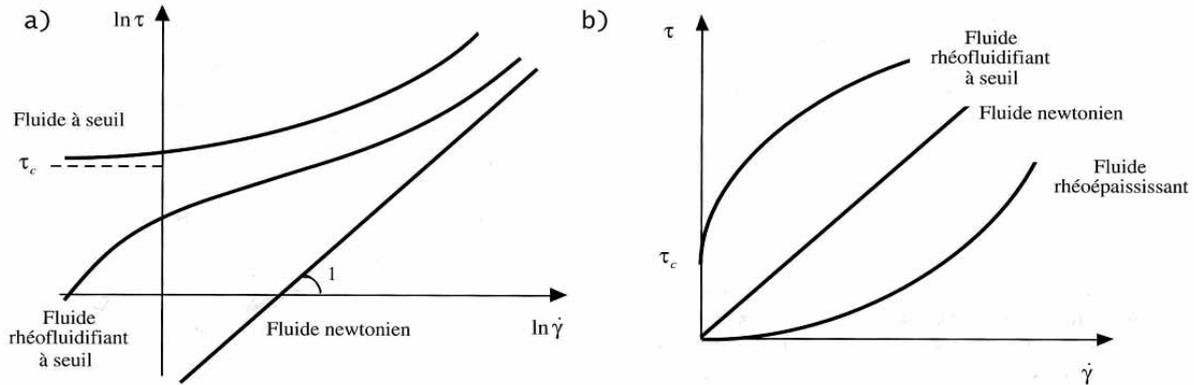


Figure I-4 : Représentation conceptuelle des principaux comportements en cisaillement simple permanent. Courbe d'écoulement dans un diagramme logarithmique (a) et dans un diagramme linéaire (b) (d'après Coussot et Ancey, 1999b)

I.4.2.2. Fluides rhéofluidifiants ou rhéoépaississants

Ces fluides présentent la particularité de se déformer de manière inégale en fonction des contraintes qui leur sont appliquées. La viscosité apparente ($\tau/\dot{\gamma}$) n'est plus constante, mais varie avec le gradient de vitesse.

- Le comportement rhéofluidifiant correspond à une décroissance de la viscosité apparente lorsque le gradient de vitesse augmente. Ce phénomène trouve son origine dans l'orientation, la déformation et la réorganisation des unités structurales contenues dans le fluide sous l'effet d'un cisaillement (ex : polymères, pétrole lourd, suspensions, etc..).
- Le comportement rhéoépaississant diffère du précédent, dans la mesure où la viscosité apparente augmente avec le gradient de vitesse. Ce phénomène est à relier à la dilatance de l'échantillon ou à des réorganisations associées à un accroissement de la fraction volumique (ex : émulsions de bitume, micelles géantes, c'est à dire des mélanges eau-tensioactifs).

Leur loi de comportement est de la forme suivante : $\tau = k \dot{\gamma}^n$, ou loi d'Ostwald de Waele (Behn, 1962; Hatfield, 1938; Ostwald, 1925; Valioulis, 1980), avec k (la consistance) et n (l'indice de fluidification) étant des paramètres caractéristiques du fluide considéré. Si la valeur de n peut être supérieure à 1, on dit alors que le fluide est dit « rhéoépaississant », ou s'il est inférieur à 1 (le cas le plus général) le fluide étant alors rhéofluidifiant.

I.4.2.3. Fluides à seuil

Ces fluides sont caractérisés par l'existence de structures plus ou moins rigides, qui peuvent se déformer légèrement jusqu'à un seuil de contrainte, sans s'écouler. En revanche, lorsque la valeur seuil est dépassée, le matériau peut adopter un comportement de type visqueux, rhéofluidifiant ou rhéoépaississant.

Il existe de nombreux modèles de comportement. Parmi ceux-là, trois lois répondent très bien aux critères qualifiant ce type de fluide : la loi de Bingham, la loi d'Herschel-Bulkley et à défaut, la loi de Casson. Cependant, dans la plupart des études s'intéressant aux comportements des sédiments cohésifs, une grande majorité des auteurs utilise le modèle rhéologique de Bingham (Liu et Mei, 1989; Mei et Liu, 1987; Nguyen et Boger, 1987; Sakayama et Bijker, 1988; Silva Jacinto, 2002; Toorman, 1995)

- Le modèle de Bingham représente un comportement newtonien une fois la contrainte seuil dépassée. Elle s'écrit : $\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$, avec η correspondant à la viscosité plastique de Bingham.
- Le modèle d'Herschel-Bulkley permet de modéliser un comportement non-newtonien une fois la contrainte seuil dépassée. Elle correspond à une loi d'Ostwald de Waele, à laquelle un seuil d'écoulement (τ_0) est rajouté. Elle a pour forme : $\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$, pour $\tau \geq \tau_0$. (remarque : $\dot{\gamma} = 0$ pour $\tau < \tau_0$). Cette loi permet, en fonction des valeurs de n , de caractériser un comportement rhéofluidifiant ou rhéoépaississant. Ce modèle reste le plus utilisé dans le domaine des suspensions et émulsions.
- Le modèle de Casson s'applique pour les liquides plastiques non-idéaux possédant un comportement plastique rhéofluidifiant, tels que les boues, les pâtes dentifrice, les pâtes à pain, les matières grasses, etc. Ces modèles sont plus répandus que les modèles de Bingham ou de Herschel-Bulkley. Ce modèle a pour forme : $\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta \dot{\gamma}}$, où η correspondant à la viscosité plastique.

I.4.2.4. Fluides viscoélastiques

Les fluides viscoélastiques possèdent, dans certaines conditions, des caractéristiques analogues à celles des corps élastiques (non fluides) et dans d'autres conditions, des caractéristiques identiques aux fluides visqueux. Si la sollicitation mécanique est très courte, le fluide adoptera un comportement élastique. En revanche, si l'effort est continu et sur une période plus longue, la réponse du fluide sera visqueuse. Ces propriétés provoquent des comportements dépendant du temps que l'on doit étudier en générant des écoulements transitoires ou harmoniques.

Les modèles de Voigt et Maxwell sont les représentations les plus simples du comportement d'un solide visco-élastique et d'un fluide visco-élastique. Ils s'expriment par :

$\frac{1}{G} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{1}{\mu} \tau = \dot{\gamma}$, avec G et μ , respectivement le module d'élasticité et la viscosité du fluide.

La viscoélasticité est une propriété qui peut être étudiée par des essais de cisaillement oscillant (Chou *et al.*, 1993 ; Maa et Mehta, 1987 ; Mei et Liu, 1987 ; Silva Jacinto, 2002). $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$ où γ_0 et ω sont respectivement l'amplitude de la déformation et la fréquence imposées. En régime établi la contrainte enregistrée s'exprime alors sous la forme $\tau = \tau_0 \cos(\omega t + \varphi)$ où τ_0 est l'amplitude de la contrainte résultante et φ le déphasage entre la contrainte et la déformation. S'il y a un déphasage de $\varphi=90^\circ$, entre la contrainte appliquée et la déformation mesurée, le matériau est un liquide purement visqueux. Si $\varphi=0$ le matériau est un solide purement élastique, pour $0 < \varphi < 90^\circ$, le système est viscoélastique.

A chaque sollicitation, une part de l'énergie est mise en réserve sous forme d'énergie récupérable, et une autre est dissipée. Il est alors possible de quantifier le module de conservation (ou module d'élasticité) G' , et le module de perte (ou module visqueux) G'' . Si le matériau est un solide élastique $G''=0$, tandis que si le fluide est purement visqueux, alors $G'=0$. De ce comportement résulte le module d'élasticité complexe, défini par $G^*(\omega)=G'+iG''$. Le module élastique (G') et le module visqueux (G'') sont alors calculés à l'aide des relations suivantes : $G'(\omega) = [\tau\gamma_0] \cos \varphi$ et $G''(\omega) = [\tau\gamma_0] \sin \varphi$.

I.4.2.5. Fluides thixotropes

Le réarrangement de la structure du matériau peut, dans certains cas, ne pas être instantané. Ce réarrangement peut se prolonger après l'application d'une contrainte. Cette dépendance temporelle, liée à l'histoire de la structure microscopique, est appelée thixotropie (Toorman, 1995). Selon Coussot et Grossiord (2001), la thixotropie témoigne de l'histoire mécanique antérieure du matériau dans la détermination de son comportement rhéologique.

I-5. Dynamique des sédiments en zones intertidales

En zone intertidale, les sédiments sont soumis à des contraintes de frottement (τ_b) générées par les vagues et/ou le courant, qui peuvent conduire à leur érosion. L'érosion ou la mise en mouvement de ces sédiments dépend de leur état de stabilisation et de consolidation, ce dernier peut être modifié par l'action d'organismes, par la modification de la composition du sédiment ou par l'influence de phénomènes climatiques.

I-5.1. Action érosive des vagues et des courants sur les sédiments

I.5.1.1. Courants et vagues

Les courants et les vagues génèrent des mouvements dans la colonne d'eau et peuvent entraîner des séquences d'érosion/dépôts de quelques millimètres à plusieurs centimètres dans les environnements vaseux (Christiansen *et al.*, 2006 ; Deloffre *et al.*, 2007 ; Dyer *et al.*, 2000 ; Lawler, 2005 ; Lee *et al.*, 2004 ; Pejrup et Andersen, 2005 ; Verney *et al.*, 2007).

- ⇒ Les courants de marée sont le résultat de plusieurs cycles (le cycle semi-diurne, le cycle semi-lunaire, le cycle lunaire et le cycle solstice/équinoxe). Aux effets astronomiques, s'ajoute la bathymétrie des zones côtières qui influence la propagation de la marée, en modifiant son amplitude et la forme de son onde et l'intensité des

courants qu'elle génère. Les courants sont définis par leur vitesse d'écoulement moyen (U) et par leur vitesse d'écoulement instantanée (u) qui peut être turbulente. Cette vitesse turbulente peut être décomposée en trois composante u' , v' et w' .

- ⇒ Les vagues trouvent leur origine dans une perturbation de la surface libre qui peut avoir comme origine le vent ou, dans certains cas, le déplacement des bateaux (phénomène de batillage, Verney et al., 2007). Elles sont caractérisées par leur longueur d'onde (L) et leur hauteur (H). Elles transmettent dans la colonne d'eau des mouvements orbitaux elliptiques, dépendant de la profondeur (fig. I-5). Lorsque ces vagues se propagent, à une vitesse orbitale (U_{br}), dans des fonds d'une profondeur (h) inférieure à une demi-longueur d'onde, les mouvements circulaires entrent en interaction avec les fonds au niveau de la couche limite de fond.

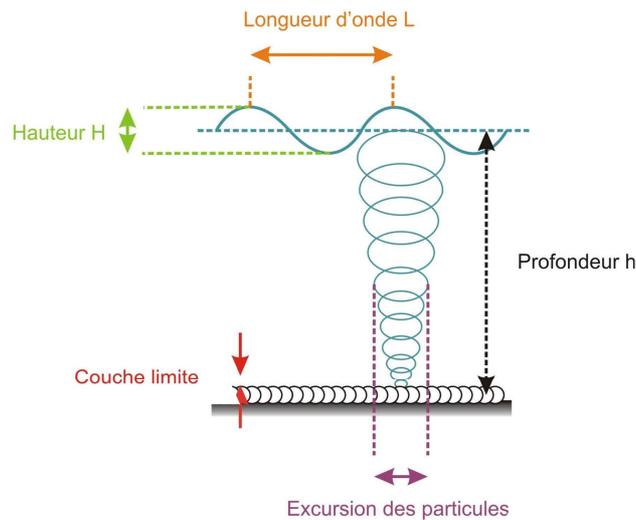


Figure I-5 : Modèle de houle linéaire simple (Stokes) pour une profondeur infinie

I.5.1.2. Dynamique de l'écoulement

Un écoulement est défini par sa masse volumique (ρ), sa viscosité moléculaire (μ), la longueur caractéristique de l'écoulement (L_e) et par sa vitesse (U). L_e correspond à la distance entre le fond et la surface libre dans le cas d'un écoulement à surface libre. L'écoulement peut être soit laminaire, soit turbulent. Pour savoir dans quel état se trouve l'écoulement, le nombre de Reynolds R_e est calculé. Cette valeur, sans dimension, décrit le rapport entre les forces inertielles et les forces visqueuses :

$$R_e = \frac{\rho U_{moy} L_e}{\mu} , \quad \text{d'où} \quad R_e = \frac{U_{moy} L_e}{\nu} \quad (1)$$

avec, ν la viscosité cinématique du fluide : $\nu = \frac{\rho}{\mu}$

Trois régimes d'écoulement existent et sont illustrés sur la figure 15 :

- ⇒ Le premier est un régime dit « laminaire ». Il correspond à des valeurs de $Re < 500$. Les forces de viscosité sont prépondérantes sur les effets inertiels. C'est un écoulement de Stokes. Les lignes de courants restent parallèles entre elles. L'écoulement est réversible si l'on change de sens les forces extérieures.
- ⇒ Entre $500 < Re < 3000$, le régime est dit « transitionnelle ». Les forces d'inertie sont prépondérantes mais l'écoulement reste laminaire. Les lignes de courants commencent à se déformer. L'écoulement devient partiellement irréversible si l'on change de sens les forces extérieures.
- ⇒ Pour un $Re > 3000$, le régime devient « turbulent ». Les forces d'inertie deviennent prépondérantes. Les lignes de courants se brisent. Des tourbillons se forment. Leurs tailles, leurs vitesses et leurs formes sont en constante évolution.

En milieu naturel, comme dans le cas d'une baie ou d'un estuaire, l'écoulement est perturbé par la rugosité et la forme du fond. Il est donc le plus souvent turbulent près du fond.

L'énergie turbulente générée par les courants est hétérogène sur la hauteur d'eau. Elle se distribue suivant un gradient négatif du fond vers la surface (Nagakawa et Nezu, 1975; Simpson et al., 2005). La structure verticale de la turbulence se décompose en deux zones (fig. I-6) : la couche externe et la zone proche de la paroi

- La couche externe est peu influencée par les frottements du fond. En l'absence de gradients de densité, l'écoulement n'est pas modifié et les vitesses du courant sont presque uniformes dans toute la colonne d'eau concernée.
- La couche proche de la paroi est une zone, dans laquelle l'écoulement est fortement ralenti par les frottements sur le fond, jusqu'à devenir nul. L'épaisseur de la couche limite représente 10 à 20% de la colonne d'eau (soit pour un courant de marée, de l'ordre de 1 à 2 m), mais concentre plus de 80% de la production d'énergie turbulente.

Sur des fonds lisses, la couche proche de la paroi peut être décomposée en trois sous-couches, d'épaisseurs variables en fonction de la nature du fond et de l'intensité turbulente de l'écoulement : une sous-couche visqueuse dans laquelle la vitesse de l'écoulement est quasi nulle, une sous-couche logarithmique dominée par les forces d'inertie et turbulente et une sous-couche faisant la transition entre les deux précédentes. En présence de rides sur le fond, les turbulences générées par ces aspérités peuvent perturber, voire modifier ce schéma.

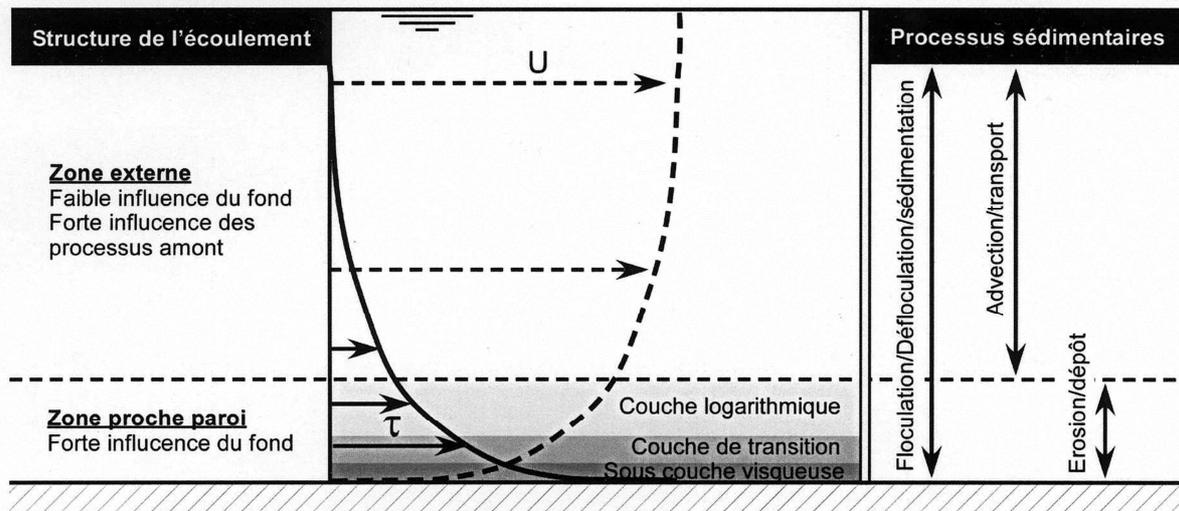


Figure I-6 : Structure turbulente de l'écoulement et processus sédimentaires en milieu côtier (d'après Verney, 2006)

L'intensité turbulente de l'écoulement près du fond conditionne aussi les processus sédimentaires (érosion/dépôt), en faisant varier la contrainte de cisaillement (τ_b) dans cette zone.

I.5.1.3. Erosion des sédiments

L'érosion des sédiments fins de surface est contrôlée par les forces de frottement qu'exercent les courants de marée et les vagues sur le fond. Le début de l'entraînement ou de l'érosion du sédiment peut être défini quand $u^* > u^{*e}$ (avec u^* : la vitesse de frottement au voisinage du fond et u^{*e} : la vitesse d'entraînement au fond des particules). La relation entre la vitesse de frottement (u^*) et la contrainte de fond (τ_b) est définie par $u^* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$. Cet entrainement engendre un flux d'érosion qui peut être défini par les relations suivantes : $E = M(\tau_b - \tau_{ce} / \tau_{ce})$, pour $\tau_b > \tau_{ce}$ (Winterwerp et van Kesteren, 2004) et avec τ_b la contrainte de fond moyenne turbulente, τ_{ce} la contrainte critique d'érosion sur le fond et M un paramètre d'érodabilité.

Trois modes d'érosion des sédiments cohésifs ont été définis par Mehta (1991) : (i) l'entraînement concerne les vases fluides et les dépôts frais, les forces de cohésion n'y étant pas très fortes. Des forçages de faible intensité peuvent permettre l'érosion des suspensions proches du fond ; (ii) le détachement par agrégats se produit lorsque du sédiment en phase de consolidation est remis en suspension ; (iii) l'érosion en masse a pour origine la présence de zones de faiblesse (fracturations, coquilles, bioturbation, interlitages sableux) dans le sédiment. Ce type d'érosion explique la formation des galets mous et des plaques d'arrachement.

⇒ Dans certaines situations météorologiques, les courants et les vagues sont présents simultanément. Ces deux phénomènes physiques peuvent interagir sur le profil de vitesse (fig. I-7) et modifier les contraintes moyennes et maximales au fond. L'action combinée des courants et des vagues sur les mouvements de sédiments peut être très important. La contrainte de cisaillement étant proportionnelle au coefficient de

frottement au fond, il est indispensable de connaître précisément la valeur de ce dernier.

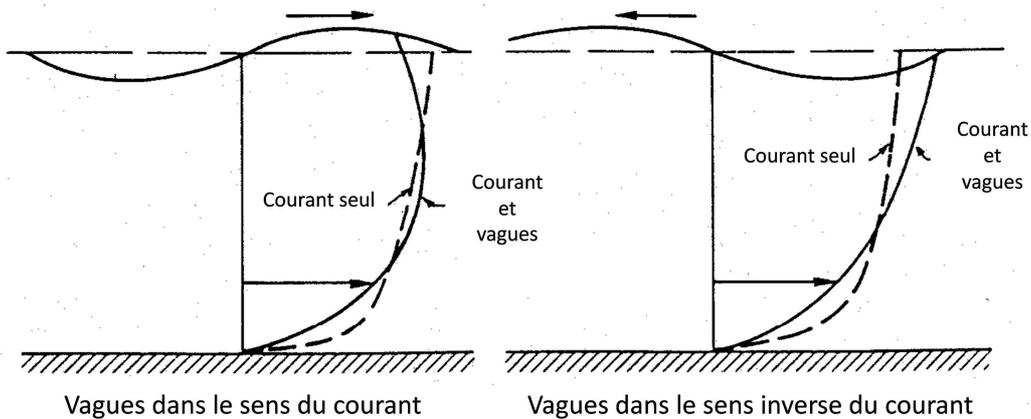


Figure I-7 : Influence de l'interaction entre les vagues et le courant sur le profil de vitesses. (d'après Van Rijn, 1990)

La figure I-8 montre le résultat de la superposition de la contrainte de cisaillement produite par le courant (τ_c) et celle induite par les vagues (τ_w). La combinaison de ces deux contraintes entraîne une augmentation de la contrainte moyenne (τ_m) et de la contrainte maximale (τ_{max}) pendant une période de vagues.

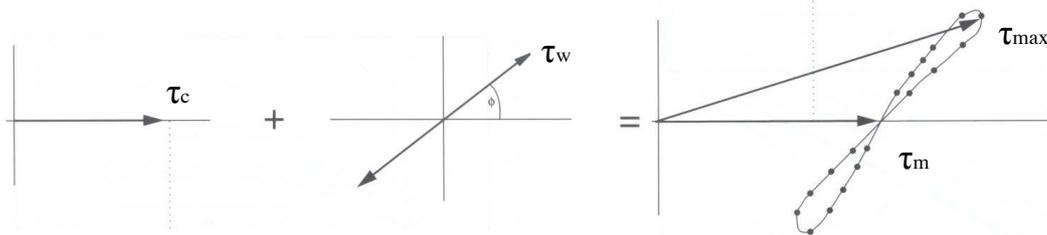


Figure I-8 : Diagramme des interactions non-linéaires des tensions de cisaillement sur le fond induites par les vagues et les courants. (d'après Soulsby et al., 1993)

I-5.2. Liquéfaction des sédiments

En plus de la génération d'un frottement sur le fond des vagues, l'action oscillatoire de ces dernières peut entraîner une réponse oscillatoire des sédiments, notamment les sédiments vaseux (Suhayda, 1984 ; Tubman and Suhayda, 1976). Ces mouvements de l'interface peuvent modifier la structure interne du sédiment par une augmentation de la pression interstitielle, et ainsi l'affaiblir plus ou moins en diminuant son seuil d'écoulement par exemple (Feng, 1993 ; Foda and Tzang, 1994), sans changement de densité (De Wit and Kranenburg, 1997 ; Ross and Mehta, 1989). Dans un cas extrême, si les liaisons structurales entre les particules sont brisées, le sédiment passe d'un comportement de sol à un comportement de fluide dense. Dans ce cas le sédiment s'est liquéfié.

L'affaiblissement de la structure interne du sédiment démarre en surface et se propage ensuite à une profondeur qui dépend de l'amplitude et de la fréquence des vagues (Feng, 1993) et du gradient de densité du sédiment (De Wit and Kranenburg, 1997 ; Lindenberg et

al., 1989) ; ainsi se forme une sorte de tapis de vase mobile (Silva Jacinto, 2002). Sous l'action de la turbulence de l'écoulement et des forces de frottement, le sédiment sera plus facilement érodable.

La liquéfaction d'un sédiment peut être précéder de la mise résonance de sa structure. Foda et Tzang (1994) ont identifiés expérimentalement, dans un canal à houle, trois types de réponse : une liquéfaction par résonance, une liquéfaction non résonante et une réponse sans résonance ni liquéfaction. Les vases s'apparentant à des fluides viscoélastiques, celles-ci possèdent une fréquence propre et lorsque la fréquence des vagues s'en approche un phénomène de résonance peut apparaître selon l'importance relative de la partie visqueuse. Foda et Tzang (1994) ont également montré que la genèse de cette résonance était le plus souvent localisée dans des endroits où l'hétérogénéité du matériel créer des zones d'écoulement interne dont la fréquence propre serait proche de celle caractérisant les vagues.

I-5.3. Auto consolidation ou tassement des sédiments

Les sédiments présents dans la colonne d'eau se déposent lorsque les contraintes de frottement sont inférieures à une tension critique dite de dépôt (τ_{cd}). Progressivement, sous l'effet de leur propre poids et suivant le temps, dû au phénomène de compaction, il y a un tassement. La structure interne du sédiment est modifiée, il y a augmentation de sa densité (*i.e.* sa cohésion) et diminution de la teneur eau (*i.e.* la porosité) sous le propre poids du sédiment (Berlamont *et al.*, 1993 ; Lesourd *et al.*, 2005 ; Migniot, 1989 ; Teisson *et al.*, 1993).

La compaction d'un sédiment se déroule en deux étapes (Migniot, 1989). Durant la première phase, les sédiments fins fraîchement déposés vont provoquer, sous l'action de leur propre poids, l'expulsion d'une partie de l'eau interstitielle et passent d'un état liquide à un état plastique (phase de compaction, proprement dite). Lors de la deuxième phase, le sédiment passe de l'état plastique à l'état solide par un réarrangement optimal des grains qui le composent ; parallèlement, la teneur en eau diminue plus ou moins rapidement avec la profondeur (Delo et Ockenden, 1989; Torfs *et al.*, 1996), avec une augmentation de la densité du sédiment en profondeur et au cours du temps, ce qui conduit à un accroissement de sa cohésion et de sa résistance à l'érosion (phase de tassement).

I-5.4. Autres paramètres modifiant la stabilité d'un sédiment

D'autres mécanismes, biologiques ou physiques, peuvent intervenir dans la stabilisation ou la déstabilisation des sédiments.

5.4.1. Modification d'origine intrinsèque au sédiment

La composition du sédiment cohésif peut influencer son seuil d'érosion. Un apport de sable peut en modifier ses caractéristiques mécaniques de manière conséquente (Torfs *et al.*, 1996 ; Mitchener *et al.*, 1996 ; Van ledden *et al.*, 2004 ; Waeles *et al.*, 2004), tant que la proportion de grains reste faible. Les suspensions eau-argiles-grains restent des fluides au comportement analogue à celui du fluide interstitiel (eau et argile). Le fluide tend à lubrifier les contacts entre les grains (Coussot et Piau, 1995). Lorsque la proportion de grains devient trop grande, le comportement du mélange devient alors plus complexe (Whitehouse *et al.*, 2000a).

5.4.2. Modifications d'origine biologiques

Biostabilisation/biodéstabilisation : Les sédiments peuvent être stabilisés par l'action directs ou indirects des organismes sur ces sédiments (Paterson, 1997 ; Widdows *et al.*, 2002). La végétation qui se développe sur le shore (Stumpf, 1983 ; Bos *et al.*, 2007) peut piéger des sédiments. Ces végétations constituent des zones d'amortissement important des courants de marée, ce qui favorise la sédimentation. La remise en suspension de ces sédiments ne se produit alors que pendant des épisodes de forte agitation (Petchick *et al.*, 1990, Paterson et Black, 1999). Les micro-organismes peuvent également jouer un rôle dans la stabilisation des sédiments (Paterson, 1997 ; Tolhurst *et al.*, 2000) par la production d'E.P.S (Extracellular Polymeric Substances). Cependant, les effets de ces E.P.S sur la stabilité des sédiments dépendent de l'environnement étudié. Il semble que leurs effets soient plus importants dans des zones à faible marnage, alors que dans des environnements à fort marnage, l'action dynamique de la marée est plus forte que l'action biologique (Winterwep et Van Kesteren, 2004).

Bioturbation : La bioturbation correspond au remaniement des sédiments par des organismes. Cela peut conduire à diminuer la stabilité des sédiments par création de terriers, de galeries ou bien par l'homogénéisation des sédiments.

Biodéposition : Les organismes filtreurs, en se nourrissant des particules fines en suspensions, vont produire des déchets (fèces et pseudo-fèces) qui vont sédimenter rapidement (Kusuki, 1978, Van Leussen, 1988 ; Martin *et al.*, 1989 ; Andersen, 2001), augmentant ainsi les taux de sédimentation. Ces agrégats sont essentiellement constitués d'éléments fins avec une forte teneur en matière organique. Ceci a pour conséquence d'accentuer la résistance à l'érosion des biodépôts par l'augmentation de leur cohésion (Sornin, 1981).

5.4.3. Modifications d'origine naturelle

Cycles émerision/immersion : Les zones intertidales sont soumises au balancement des marées. De manière cyclique (diurne ou semi-diurne), ces zones sont exondées et inondées. Ceci a pour conséquence de faire varier la teneur en eau dans le sédiment et donc la cinétique de sa cohésion (Amos *et al.*, 1998 ; Paterson *et al.*, 1990)

Evaporation/drainage : L'évaporation intervient lors des périodes d'émerision. Elle peut être liée à l'action du vent et/ou du soleil. Le sédiment de surface voit sa teneur en eau diminuer et la salinité de l'eau restante augmenter. Le drainage produit aussi une diminution de la teneur en eau du sédiment. Ces deux phénomènes augmentent la cohésion du sédiment.

Dessiccation : Lors des périodes d'émerisions prolongées (Morte-eau dans la partie haute de l'estran) et/ou associées à de fortes chaleurs, le sédiment peut alors s'assécher de manière importante. Ceci a pour conséquence, l'apparition de fentes de dessiccation. Dans certains cas ces fentes peuvent fragiliser le sédiment lors d'une marée importante ou d'un événement météorologique important en favorisant des surfaces de décollement (mudcracks).

Pluviosité : La pluie peut entraîner des changements dans la cohésion d'un sédiment, par l'ajout d'eau dans ce dernier et/ou en modifiant les caractéristiques chimiques de l'eau interstitielle (Voulgaris et Meyer, 2003).

Gel/dégel : Le gel et le dégel peuvent modifier aussi le comportement mécanique d'un sédiment, en cassant par exemple les liaisons entre les particules fines. Ceci favorise alors le transport des sédiments par les courants ou les vagues (Pejrup et Andersen, 2000). Cependant, ce phénomène reste rare sous nos latitudes

I-6. Conclusions

Ce rappel sur la dynamique sédimentaire en zone intertidale à permis de mettre en avant les différents états des sédiments ainsi que leurs particularités intrinsèques tels que leurs comportements mécaniques, et également de faire le point sur les conditions d'érosion, de transport et de dépôt de l'interface sédimentaire, sous l'action des contraintes de frottement sur le fond des vagues et/ou des courants.

Il apparaît que les conditions de mise en mouvements des sédiments superficiels dans ces zones dépendent essentiellement de leur comportement mécanique et des forçages qui vont agir sur eux. Or dans la plupart des études sur les environnements littoraux, l'étude du comportement mécanique des sédiments est souvent négligée. Afin d'avoir une vision globale des mécanismes hydro-sédimentaires, il est important de coupler une approche « matériaux », relative au comportement mécanique du sédiment, avec une approche « hydro-sédimentaire », relative aux effets des forçages hydrodynamiques sur le fond.

L'approche « matériaux », avec la sédimentologie et la rhéologie, a mis en évidence l'importance de la taille des particules, de la concentration et de la résistance au cisaillement (τ_y) des sédiments fins et mixtes pour déterminer les comportements des sédiments et les conditions de leur érosion.

L'approche hydro-sédimentaire repose à la fois sur une description théorique des conditions d'écoulements (vitesse, contrainte pariétale) en fonction de la nature de l'interface (rugosité, turbulence, couche limite, taille des particules) pour définir la contrainte de cisaillement au fond.

Le schéma suivant (fig. I-9) permet de mieux comprendre les interactions entre les différentes approches, « matériaux » et hydrosédimentaires, dans l'étude de l'interface sédimentaire.

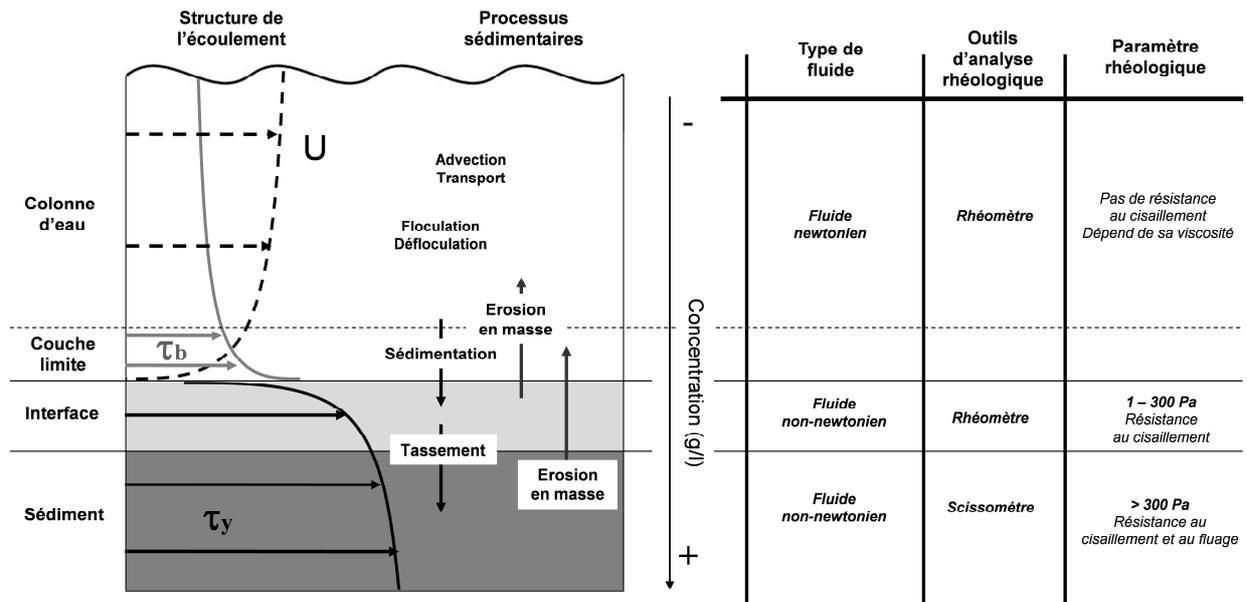


Figure I-9 : Structure de l'écoulement, processus sédimentaires et caractéristiques rhéologiques des différents états des sédiments dans la colonne d'eau et à l'interface

Partie II : La baie de Marennes-Oléron

II-1. Objectifs de l'étude

Dans cette partie, nous nous proposons de définir le contexte du site d'étude en réalisant une rapide revue des différentes connaissances scientifiques dans les domaines hydrodynamiques (courants, vagues) et sédimentaire (nature des fonds, couverture sédimentaire) et des différentes données météorologiques (vitesses et directions mensuelles des vents) acquises au cours des 30 dernières années. Les différents secteurs de la baie sont définis et l'influence de la conchyliculture sur la sédimentation est également mise en avant.

II-2. Définitions générales des baies

D'après Cromwell (1971), les baies ou lagunes côtières représentent environ 13% des côtes mondiales. Leurs positions géographiques et leurs formes correspondent le plus souvent à la position des vallées ennoyées au cours de la transgression flandrienne (Bertin et Chaumillon, 2005 ; Fitzgerald *et al.*, 2002 ; Hume et Herdendorf, 1988 ; Kraft, 1971). Leur définition ne repose pas, à l'heure actuelle, sur un consensus général. Ainsi, de nombreuses classifications existent, basées sur leur forme, leur position géographique, la nature des forçages hydrodynamique qui y dominent, etc.

D'un point de vue du droit maritime (*cf.* la convention des Nations unies sur le droit de la mer, article 10), « on entend par « baie » une échancrure bien marquée dont la pénétration dans les terres est telle que les eaux qu'elle renferme sont cernées par la côte et qu'elle constitue plus qu'une simple inflexion de la côte. Toutefois, une échancrure n'est considérée comme une baie que si sa superficie est au moins égale à celle d'un demi-cercle ayant pour diamètre la droite tracée en travers de l'entrée de l'échancrure. » Cependant, cette définition n'est pas suffisante pour caractériser les baies d'un point de vue topographique et morphodynamique.

Néanmoins, il ressort que le point commun entre l'ensemble des baies est d'être muni d'un plan d'eau étroit, parallèle à la côte et séparé de l'océan par un système d'île barrière ou par des flèches sableuses (Bertin, 2005). Cependant, il est important de bien faire la distinction entre une petite mer fermée à semi-fermée et une baie fermée à semi-fermée. Pour cela, Healy et Harada (1991) proposent de les différencier à partir de la valeur du rapport entre la longueur maximale de la baie sur la longueur totale de ces ouvertures. Si ce rapport est inférieur à 4, la baie est alors de type semi-fermée à fermée, tandis que s'il est supérieur à ce nombre, l'entité étudiée est de type mer fermée à semi-fermée. La distinction entre les termes « semi-fermée » et « fermée » ne dépend que du nombre d'ouverture sur la haute mer.

D'après Pritchard (1967) et Perillo (1995), les baies peuvent être assimilées à des formes particulières d'estuaire, dont l'hydrodynamique est dominé essentiellement par la marée et la houle. Kjerve (1986) les distingue, quant à lui, des estuaires (*au sens strict*) sur la base d'arguments morphologiques. Les baies sont généralement constitués de zones intertidales (ou « flat »). En fonction des sources d'alimentation sédimentaire et de l'intensité de l'hydrodynamisme local, la nature sédimentologique de ces estrans peut varier énormément. Le plus souvent les baies sont constituées de vastes vasières (ou « mudflat »).

Enfin, Dyer *et al* (2000) proposent une classification des vasières intertidales basée sur des mesures de terrains facilement réalisables, comme le marnage, le type de marée, la longueur de l'estran, son orientation, la teneur en matière organique, la cohésion au pic, etc. Pour Dyer, le marnage, l'exposition aux vagues et la pente de la vasière constituent les éléments externes les plus importants au niveau de la dynamique sédimentaire. A un second niveau, une séparation est faite à partir des densités sèches du sédiment de surface. Les processus biologiques apparaissent selon lui, comme négligeables.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous proposons de définir le contexte du site d'étude en réalisant une revue des différentes connaissances scientifiques dans les domaines hydrodynamiques (courants, vagues) et sédimentaire (nature des fonds, couverture sédimentaire) et des différentes données météorologiques (vitesses et directions mensuelles des vents) acquises au cours des 30 dernières années. Les différents secteurs de la baie sont définis et l'influence de la conchyliculture sur la sédimentation est également mise en avant.

II-3. Présentation de la baie de Marennes-Oléron

II-3.1. Caractéristiques morphologiques et sédimentaire de la baie de Marennes-Oléron

II-3.1.1. Morphologie de la baie

La baie de Marennes-Oléron, qui est située dans le département de la Charente-Maritime (France), constitue un système semi-fermé, localisé entre l'île d'Oléron et la côte charentaise. La limite Nord est matérialisée par un parallèle reliant la Pointe des Saumonards à la Pointe de Fouras (fig. II-1) et la limite sud correspond à une ligne entre la Pointe de Gatseau et la Pointe d'Arvert.

Du fait de cette configuration particulière, la baie est un système complexe d'un point de vue bathymétrique, hydrodynamique, hydrologique et sédimentaire.

Ce bassin (fig. II-1) peu profond (8,6 m en moyenne) présente un marnage de type macrotidal (marnage moyen de 5 m). La superficie totale du bassin est d'environ 156 km². Les zones intertidales représentent 58 % de cette surface, soit environ 91 km² (Bassoullet *et al.*, 2000 ; Gouleau *et al.*, 2000 ; Stanisière *et al.*, 2006). Un étranglement rocheux au niveau d'une ligne Ors - Le Chapus divise le bassin en deux parties de tailles inégales :

- **La partie Nord**, couvrant les 2/3 du bassin, avec une large ouverture (10 km) sur le pertuis d'Antioche. Dans le coureau d'Oléron, les masses d'eau circulent préférentiellement dans deux chenaux parallèles (Chenal de l'Ouest et Chenal de l'Est) qui se rejoignent au niveau du Chapus pour former le coureau central.
- **La partie Sud**, couvrant le tiers restant, qui communique avec l'océan Atlantique par une ouverture très étroite (le pertuis de Maumusson). Le coureau d'Oléron s'y transforme en une série de petits canaux qui mettent en relation d'une part le coureau

central et le pertuis de Maumusson et d'autre part l'embouchure de la Seudre et le pertuis de Maumusson.

Deux rivières alimentent directement la partie Nord et la partie Sud du bassin en eau douce et en sédiments. La plus importante est la Charente (au Nord) avec des débits variant entre 10 et 400 m³.s⁻¹, alors que les débits de la Seudre sont dix fois moindres (Soletchnik *et al.*, 2007; Struski, 2005).

De nombreux marais côtiers alimentent aussi, ponctuellement, en eau douce le système. Compte tenu de ces caractéristiques, il s'agit d'une baie semi-fermée à influence estuarienne, et non d'une lagune.

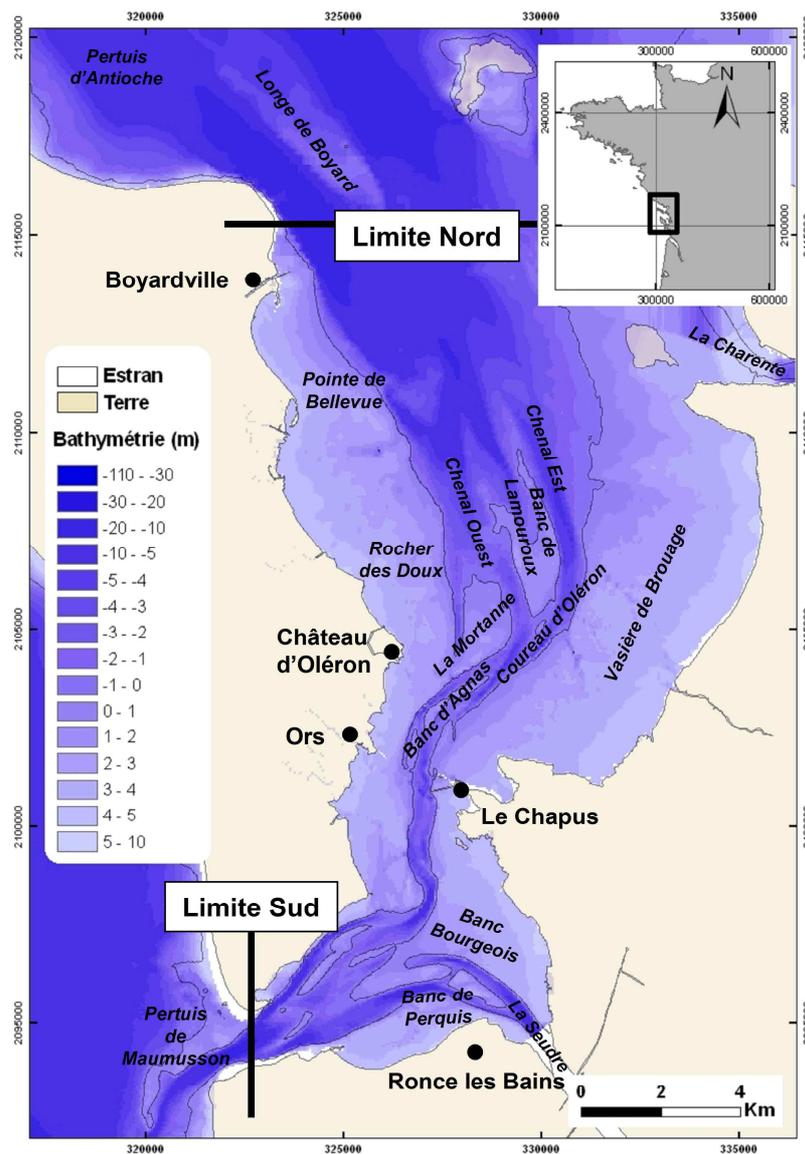


Figure II-1 : Carte bathymétrique de la baie de Marennes-Oléron (Charente-Maritime)

⇒ D'un point de vue morphosédimentaire, Pouliquen (1975) divise la baie en trois entités différentes (fig. II-2):

Le domaine oriental : L'est et le nord-est du bassin constitue une grande vasière, d'une superficie d'environ 40 km², sur une distance à la côte de 4 km avec une pente moyenne de 1/800 (Gouleau *et al.*, 2000). Les sédiments, de type argilo-silteux, sont composés de 92% de particules fines (Galois *et al.*, 2000). Cette vasière peut être divisée en trois zones aux caractéristiques géomorphologiques et hydrodynamiques bien particulières (Germaneau et Robert, 1995).

- La vasière supérieure, de 500 m de large, est constituée d'un réseau de banquettes-seillons de faibles dimensions. Cette partie de la vasière est le siège d'une forte sédimentation de vase fluide lors des périodes de temps calme. Cette vase recouvre alors toute la zone, lui donnant un aspect complètement plat. Cette vase est emportée, par remise en suspension, vers le large en période de vent d'ouest (Bassoullet *et al.*, 2000).
- La vasière intermédiaire s'étend sur près de 3 km. Elle est entrecoupée d'un système très marqué de banquettes-seillons de dimension métrique à décimétrique, parallèles entre eux et perpendiculaires à la côte. Ce réseau est parfaitement organisé, ce qui facilite le drainage des sédiments entre la partie haute et la partie basse de la vasière. Les banquettes occupent, selon les zones décrites, une surface de l'ordre de 63 % alors que les seillons occupent une surface de l'ordre de 37 % (Germaneau et Robert, 1995 ; Gouleau *et al.*, 2000 ; Orvain, 2002).
- La vasière inférieure s'étend sur 800 m. Elle est occupée depuis la fin du XIX^e siècle par des cultures de moules sur bouchot. On y trouve aussi de grandes étendues de crassats d'huîtres, reliquats d'anciennes exploitations ostréicoles datant de la même époque. Ces obstacles hydrodynamiques, associés à une biodéposition importante (Sornin *et al.*, 1983), empêchent la communication entre les seillons et le coureau central.

Le domaine occidental : Ce domaine occupe toute la zone du littoral oléronais. Il constitue un platier sablo-vaseux. (Hily, 1977 ; Sauriau *et al.*, 1989). Au Nord, au niveau de Boyardville, il existe un petit delta caractérisé par des barres sableuses, qui migrent vers le sud lors des grosses tempêtes hivernales.

Plus au Sud, la partie basse de ce platier est occupée par des installations conchylicoles (huîtres et moules). La présence de ces activités entraîne une modification dans la sédimentation locale par la production de fèces et pseudo fèces d'huîtres et de moules.

La partie haute et médiane de l'estran est caractérisée par la présence de grandes étendues d'herbier à zostères (*zoostera noltii*) (Guillaumont, 1991). Ces herbiers occupent 8,65 km² (Pigeot *et al.*, 2006). Ils ont pour particularité d'avoir un développement saisonnier. Lors de leur développement maximal en été, ces herbiers peuvent provoquer un piégeage des particules fines. En hiver, les feuilles des herbiers disparaissent, seuls persistent les rhizomes dans le sédiment (Van Keulen et Borowitzka, 2003).

Le domaine central : Il est traversé par le coureau d'Oléron et s'étend jusqu'au pertuis de Maumusson. Ce domaine est constitué de nombreux bancs de sable (moyens à grossiers),

façonnés par les forts courants de marée. Plusieurs bancs sont aménagés pour l'ostréiculture. La présence de ces installations et l'activité biologique des huîtres induisent un engorgement local important. Il n'est pas rare de trouver des épaisseurs de vases de plusieurs dizaines de centimètres (Sornin, 1981).

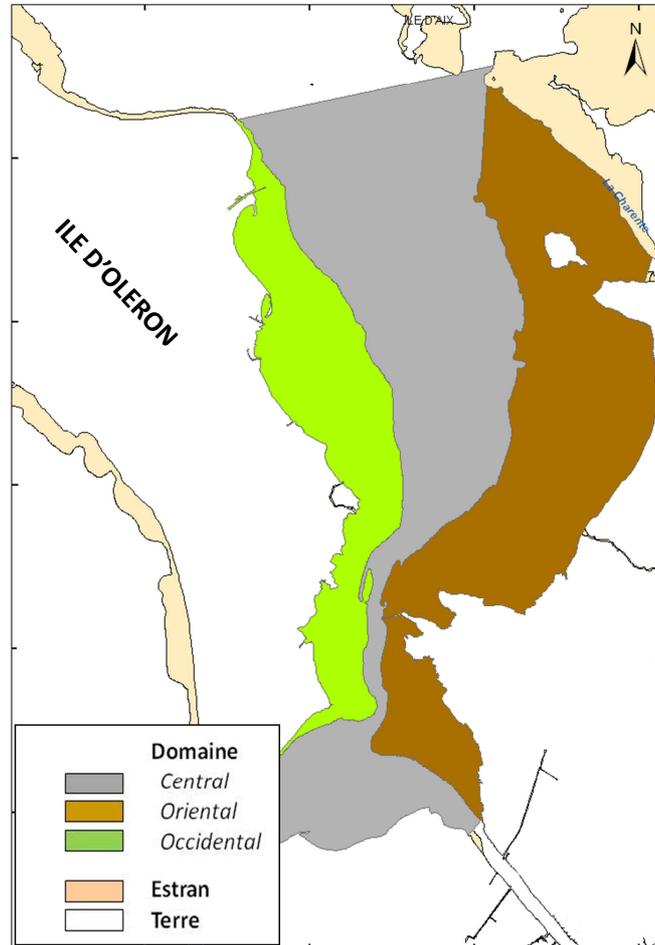


Figure II-2 : Carte des différents domaines de la baie de Marennes-Oléron.

II-3.1.2. Couverture sédimentaire

Les sédiments superficiels de la baie ont pour origines plusieurs sources sédimentaires et se répartissent dans la baie selon des domaines largement identifiés.

Origines des sables : Les matériaux sableux (calcaires et siliceux) proviennent respectivement des falaises calcaires et des dunes de la partie Nord-est de l'île d'Oléron et des dunes littorales du pertuis de Maumusson, qui subissent l'assaut des houles de l'Atlantique. Ces sables alimentent la baie par l'intermédiaire de la dérive littorale, au niveau des deux pertuis (Pouliquen, 1975 ; Tesson, 1973).

Origines des matériaux fins : Une partie de ces matériaux provient du complexe Gironde-vasière Ouest-Gironde (Boutier et al., 2000 ; Castaing, 1981 ; Lazure et Jegou, 1998 ;

Parra et al., 1998) Brassés et mélangés au large, ces sédiments acquièrent les mêmes caractéristiques minérales que les vases de la baie. Lorsque ces sédiments arrivent dans le bassin de Marennes-Oléron par le pertuis d'Antioche, ils vont se déposer sur les vasières sablo-vaseuses de la côte oléronaise.

Une autre partie des matériaux fins provient des bassins versants des rivières charentaises, la Charente et la Seudre (Tesson, 1973). Les matières en suspensions sont constituées d'argiles de type kaolinite et par des éléments traces métalliques (plomb, zinc, cuivre et manganèse) en concentrations importantes. Ces particules, issues de la Charente, se retrouvent plaquées par les courants et les vents dominants sur la vasière orientale (Monportail). Elles vont alors subir de nombreux cycles d'érosion/dépôt, sous l'action des clapots et des précipitations, avant d'être définitivement stabilisées. Les sédiments de la Seudre, en moindre quantité, vont être confinés dans la partie sud du bassin.

Répartition spatiale : Deux cartes (fig. II-3 et II-4) représentant les différents faciès superficiels de la baie ont été réalisées par Hily (1977) et par Weber (2004). Ces cartes ont été établies à l'aide de prélèvements réalisés à la benne sur une épaisseur d'une dizaine de centimètres, mais aussi en intégrant des données anciennes. Ces cartes montrent donc une couverture sédimentaire moyenne en identifiant globalement les différents domaines et les principaux types de sédiments identifiés, caractéristiques d'une longue période qui ne prend pas en compte la saisonnalité. Cependant, cette couverture sédimentaire moyenne n'est pas représentative des variations de la composition des sédiments superficiels sur le « court terme » (marée, tempêtes et saisons).

Il apparaît qu'il existe de grosses différences entre les deux cartes, notamment dans la partie Ouest de la baie. En revanche la partie Est de la baie reste de composition identique. Ces différences peuvent être liées à des changements de régime hydrodynamique ou encore liées à l'activité ostréicole. Néanmoins il est curieux de constater, sur la carte établie par Weber (2004), l'absence de la flèche sableuse de la pointe de Bellevue (fig. II-1), qui est actuellement visible. Cette flèche sableuse est parfaitement identifiée par Hily (1977).

Weber ayant essentiellement travaillé sur des échantillons en domaine subtidal, contrairement à Hily, il est fort possible que la représentation de la couverture sédimentaire des zones intertidales proposée par Weber soit moins précise que celle proposée par Hily. De même, ces différences peuvent être liées aux coupures granulométriques choisies et aux méthodes de mesures de la taille des particules, ou encore des périodes de prélèvements des sédiments. Cependant, les informations fournies par Weber sur sa méthode sont trop peu documentées pour préciser l'origine de cette divergence.

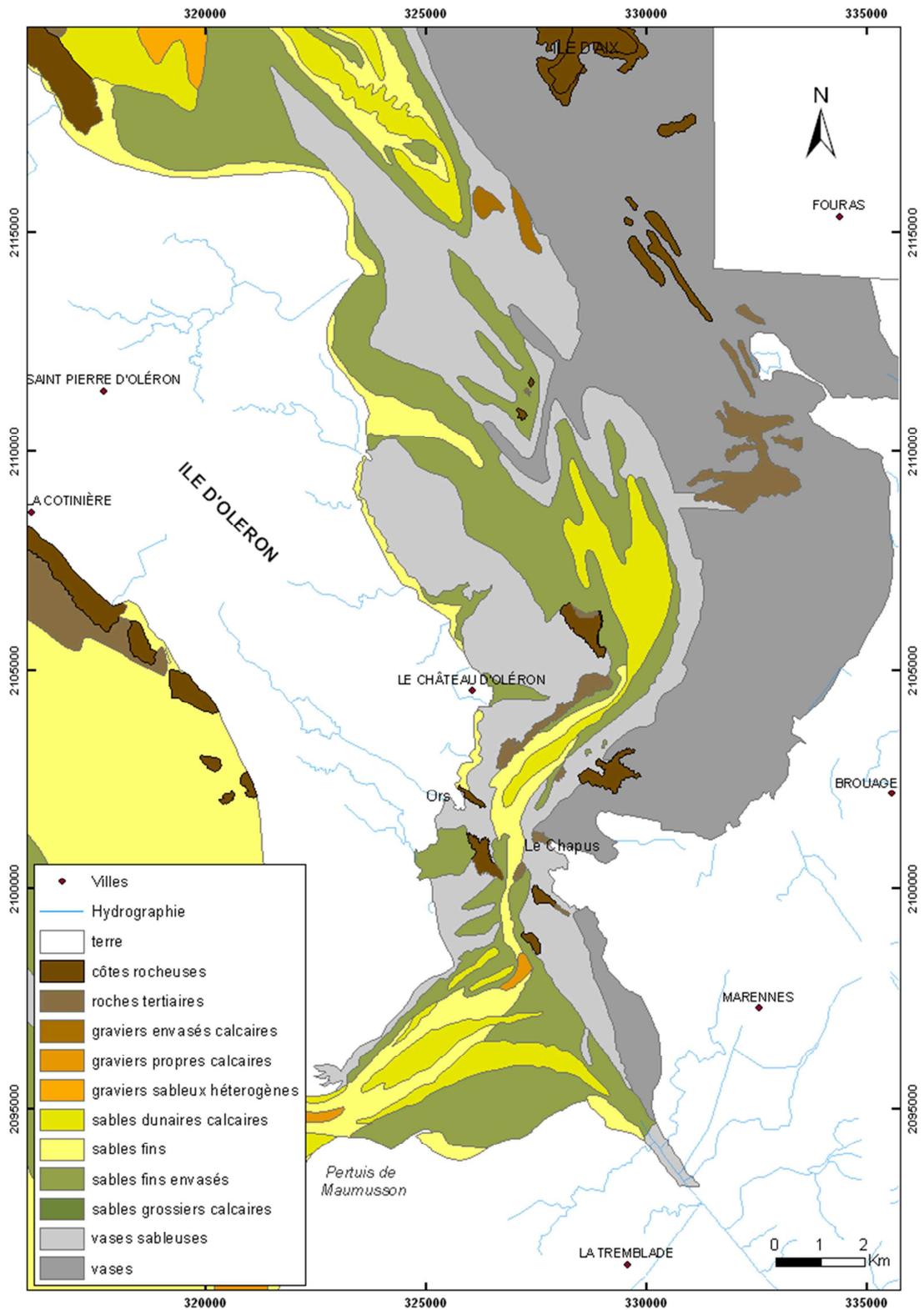


Figure II-3 : Répartition des différents faciès bio-sédimentaires en baie de Marennes-Oléron, d'après Hily (1977). Les prélèvements ont été réalisés à la benne et concernent une épaisseur d'environ 15 cm

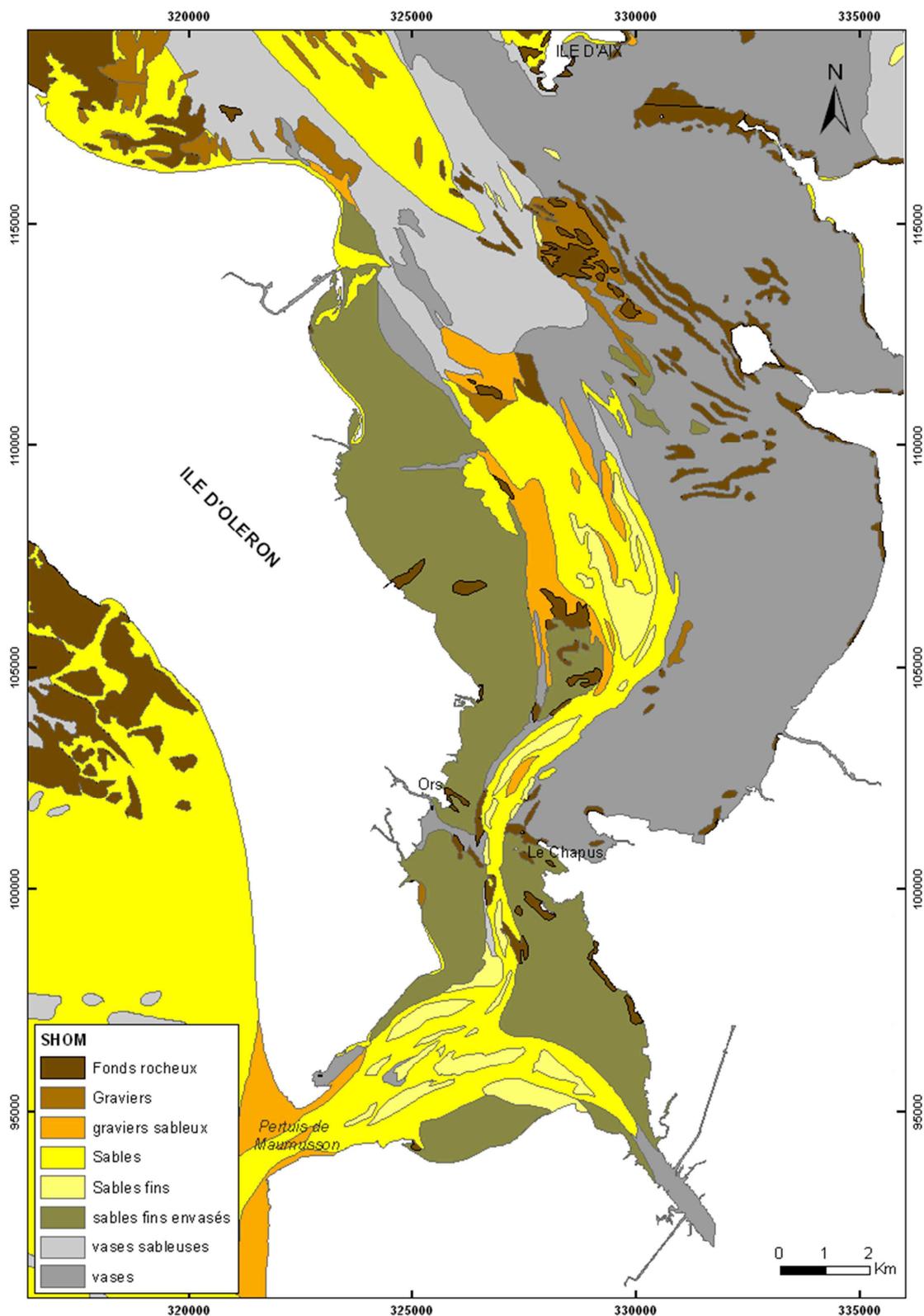


Figure II-4 : Répartition des différents faciès sédimentaires en baie de Marennes-Oléron, d'après Weber (2004), pour le SHOM. Les prélèvements ont été réalisés à la benne et concernent une épaisseur d'environ 15 cm

II-3.1.3. Taux de sédimentation

Sous l'effet des actions anthropiques de poldérisation, le bassin de Marennes-Oléron a subi au cours des derniers siècles de spectaculaires transformations géomorphologiques (Bertin *et al.*, 2005; Verger, 1968) qui ont conduit à des modifications des actions des courants de marée à l'intérieur du bassin, tandis que l'évolution naturelle des embouchures agissait fortement sur le taux de sédimentation. Bertin *et al.*, (2005) ont montré, par l'étude de bathymétries anciennes, que la section mouillée (liée au prisme tidal lors des marées d'équinoxe) à l'embouchure du pertuis de Maumusson a été réduite de 35% depuis 1824 (fig. II-5). Ils ont ainsi calculé que le taux de sédimentation moyen de l'ensemble de la baie, depuis 1824, était d'environ $0,46 \text{ cm.an}^{-1}$.

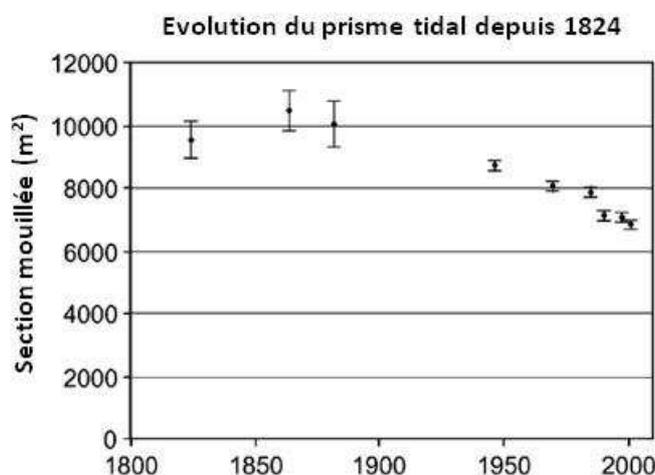


Figure II-5 : Evolution du prisme tidal de la baie de Marennes-Oléron, au cours des 200 dernières années. (Bertin *et al.*, 2005)

Le taux de sédimentation récent sur la vasière de Monportail a été estimé à l'aide de datation et de mesures altimétriques, dans le cadre de la campagne INTRMUD en 2000. A court terme, la sédimentation instantané peut atteindre environ 21 cm.an^{-1} dans les seillons et d'environ 7 cm.an^{-1} sur les banquettes. Cependant, ces sédiments peuvent être rapidement emportés lors des marées de vives eaux et lors des tempêtes. A long terme, le taux de sédimentation de la partie haute de la vasière a été estimé à $0,26 \text{ cm.an}^{-1}$, tandis que dans la partie basse (proche des parcs à huîtres et des bouchots à moules), il est d'environ $0,97 \text{ cm.an}^{-1}$. La partie médiane montre des taux de sédimentation de $0,70 \text{ cm.an}^{-1}$ au niveau des banquettes et $0,07 \text{ cm.an}^{-1}$ dans les seillons (Gouleau *et al.*, 2000).

II-3.2. Conditions météo-océaniques et hydrodynamiques

Avec sa grande superficie et sa morphologie quelque peu « ouverte », l'hydrodynamisme de la baie de Marennes-Oléron est largement influencé par la propagation de l'onde de marée et des courants qu'elle génère. C'est aussi une baie qui est sous l'influence des clapots (générés par les vents locaux) et des vagues (générées par les vents locaux et les

vents du large) qui peuvent se propager par le pertuis d'Antioche jusque sur les estrans. Ces agents sont déterminants pour les mécanismes d'érosion.

II-3.2.1. Marée

La marée correspond à une variation (marnage) plus ou moins périodique du niveau de la mer et des océans. Cette variation a pour origine les effets conjugués des forces de gravitation de la lune et du soleil sur la masse des océans. Dans le bassin de Marennes-Oléron, la marée est de type semi-diurne, avec deux hautes-mer (HM) et deux basses-mer (BM) par jour. Le marnage correspond à la différence de hauteur d'eau, pour un jour donné, entre le niveau de la haute-mer et celui de la basse-mer. Dans la baie, ce marnage, de type macrotidal, varie continuellement, entre 2 et 6 mètres (Struski, 2005).

Tesson (1973) a bien décrit la pénétration des ondes de marée dans la baie de Marennes-Oléron. En considérant les caractéristiques de la marée aux entrées Nord et Sud de la baie (île d'Aix et pertuis de Maumusson), il apparaît qu'il s'agit de deux ondes différant en phase et en amplitude, et que la marée à Maumusson se rapproche plus de la marée au large. La pénétration de ces deux ondes dans la baie s'effectue par des chenaux de formes très différentes qui amplifient leurs particularités originelles. La conjonction de l'action de ces deux ondes engendre en chaque point de la baie des déphasages en temps et en hauteur, et des inégalités d'amplitude. Le plan d'eau du bassin est donc, à tout moment, distordu et instable.

La marée dans le bassin étant de type macrotidale, la masse d'eau qui se déplace au cours d'une marée (volume oscillant) est très importante. Le volume oscillant moyen est estimé à environ 610 millions de m³, soit près de 75 % du volume moyen du bassin (805 millions de m³). La marée joue un rôle très important dans le fonctionnement dynamique du bassin (Stanisière *et al.*, 2006).

II-3.2.2. Courants

La bathymétrie complexe de la baie induit une circulation des masses d'eau complexe. Les deux sous-bassins possèdent chacun un fonctionnement hydrodynamique distinct.

La différence de dimension des ouvertures Nord et Sud provoque un apport important d'eau provenant du pertuis d'Antioche dans le bassin. Les entrées d'eau par le pertuis de Maumusson sont freinées puis repoussées vers le sud. La circulation résiduelle (fig. II-6) des masses d'eau est orientée le long d'un axe nord-sud (Klingebiel *et al.*, 1971 ; Stanisière *et al.*, 2006). Le temps de résidence des masses d'eau est estimé entre 4 et 10 jours (Heral *et al.*, 1989). Les courants maximums (1 m.s⁻¹) sont observés lors des vives eaux, au niveau des goulets d'étranglement et dans les chenaux (Tesson, 1973). Dans les zones intertidales, les courants ne dépassent pas 0,60 m.s⁻¹ (Bassoullet *et al.*, 2000).

Au moment du flot, les eaux marines pénètrent par la passe et le long de la Longe de Boyard, ce qui entraîne un rabattement des eaux de la Charente sur la partie orientale de la baie (Stanisière *et al.*, 2006). Par conséquent, le coureau d'Oléron subit l'influence de deux masses d'eau qui ne possèdent pas les mêmes caractéristiques. A l'Ouest, les eaux, de type marine, ont une salinité élevée (>30 ‰). A l'Est, des eaux plus saumâtres (29 ‰ < salinité < 30 ‰) résultent d'un mélange entre les eaux marines et les eaux de la Charente (Tesson, 1973). Dans le pertuis de Maumusson, la zone de Ronce les Bains est faiblement influencée par les entrées d'eaux marines dans le pertuis (Klingebiel *et al.*, 1971). D'après les

simulations hydrodynamiques de la baie faites par Stanisière *et al.* (2006), l'effet du pertuis de Maumusson est négligeable dans les échanges d'eaux entre l'océan et le bassin.

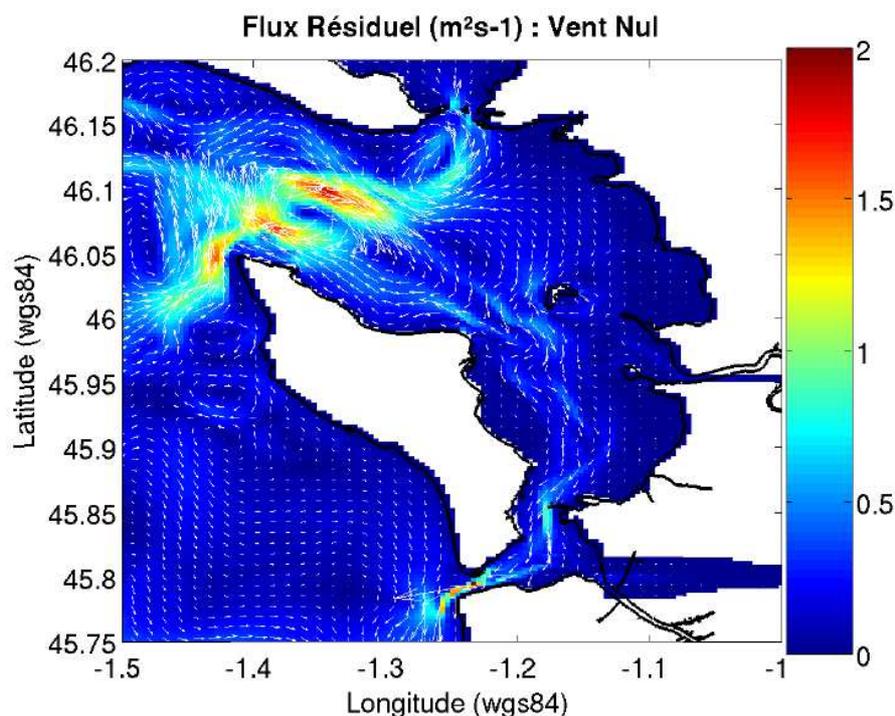


Figure II-6 : Direction et intensité des flux résiduels au niveau du pertuis d'Antioche et dans le bassin de Marennes-Oléron, en l'absence de vent. (d'après Stanisière *et al.*, 2006)

Les mesures de salinité ont montré que la Charente influence de manière significative le bassin (Heral *et al.*, 1984 ; Ravail *et al.*, 1988). Les simulations réalisées avec Mars 2D, qui sont d'ailleurs en accord avec ces mesures (Stanisière *et al.*, 2006), ont permis de montrer que la progression de ces eaux reste limitée à la partie Est du coureau d'Oléron, sans jamais toucher les côtes oléronaises. De même elles ont indiqué que le faible débit de la Seudre n'impacte pas ou peu le bassin.

Il a également été montré lors de ces simulations que le temps de renouvellement (*flushing time*) des eaux du bassin (fig. II-7), c'est-à-dire le temps moyen qui doit s'écouler pour qu'un volume d'eau soit remplacé entièrement par des apports postérieurs, était voisin de 14 jours pour l'ensemble du bassin, en l'absence de vent. Stanisière *et al.* (2006) ont utilisé la méthode CSTR (« continuously stirred tank reactor »), comme décrite dans Monsen *et al.* (2002). Dans cette méthode, il est supposé que l'introduction d'un élément conservatif dans le domaine se fait de façon instantanée et homogène sur l'ensemble du bassin. De cette façon, la concentration de ce constituant à la sortie du bassin est égale à sa concentration en tout point du bassin. Des différences importantes apparaissent en divers endroits du bassin. Ainsi, dans la zone d'estran située le long de la côte continentale (vasière de Brouage), le temps moyen de renouvellement est compris entre 20 et 35 jours, tandis que dans la partie occidentale (côte Oléronaise) celui-ci est plus rapide (15 à 20 jours).

Ces résultats de simulations indiquent également un confinement important des eaux sur la vasière, ainsi qu'un renouvellement plus lent dans le pertuis de Maumusson. Ces

différences de renouvellement devraient entraîner des conséquences importantes en termes de sédimentation et d'envasement dans cette zone.

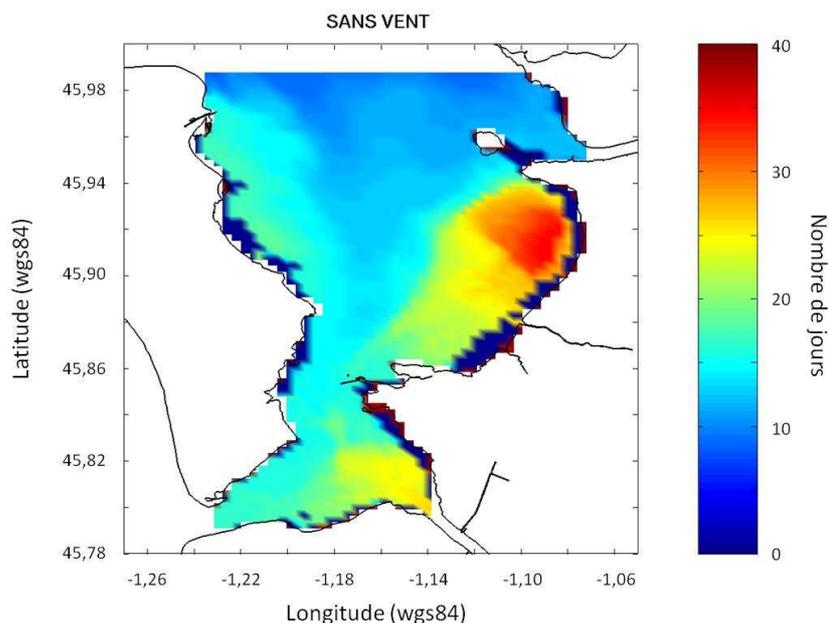


Figure II-7 : Renouvellement spatialisé (en jours) en situation de vent nul. (d'après Stanisière et al., 2006)

II-3.2.3. Vents

La distribution des vents mesurés par Météo France durant la période 1990-2002, à Chassiron (fig. II-8), montre une saisonnalité dans la direction et l'intensité des vents dominants (Stanisière et al., 2006).

De décembre à février : Les vents sont prédominants dans les secteurs Sud-est et Nord-est. Les vents forts, supérieur à 8 m.s^{-1} , sont fréquents (25,7%) et sont de secteur Sud à Nord-est. Les vents moyens ($4,6$ à 8 m.s^{-1}) soufflent la moitié du temps (41,8%) et ont des directions Sud à Sud-est. Les vents faibles (0 - $4,5 \text{ m.s}^{-1}$) soufflent pendant environ 29% du temps, avec une direction Nord-est à Sud-est. Les vents d'Est sont rares.

De mars à mai : La majorité des vents a pour direction le secteur Sud-ouest à Nord-Ouest et Nord-est. Les vents forts soufflent environ 18,7% du temps, le plus souvent au secteur Sud-est et Nord-est. Les vents moyens représentent 42,8% et proviennent des secteurs Sud-ouest à Nord-est. Les vents de faible intensité soufflent pendant près d'un tiers du temps (34,8%) sans directions dominantes. Les vents de Nord-est à Sud-est restent rares.

De juin à août : Les vents dominants sont de Sud-ouest à Nord-Ouest. La fréquence des vents forts est faible (9,6%). Ils proviennent essentiellement des secteurs Sud-est à Nord-Ouest. Les vents de moyenne intensité soufflent la moitié du temps (44,5%). Et ils sont orientés au secteur Sud-ouest à Nord-Ouest. Les vents faibles sont aussi fréquents (42,5%), de direction Sud-ouest à Nord-est. Les vents de Nord-est à Sud-est sont quasi inexistantes.

De septembre à novembre : La direction de vents dominants est plutôt bien répartie, avec une tendance un peu Sud-ouest à Ouest et aussi Nord-est. La fréquence des vents forts

augmente (23,5%), au secteur Sud-ouest à Nord-Ouest. Les vents moyens soufflent 38,7% du temps, selon toutes les directions. Les vents faibles correspondent à un tiers du temps (34,1%) et sont de Nord-est à Sud-est. Les vents d'Est sont peu fréquents.

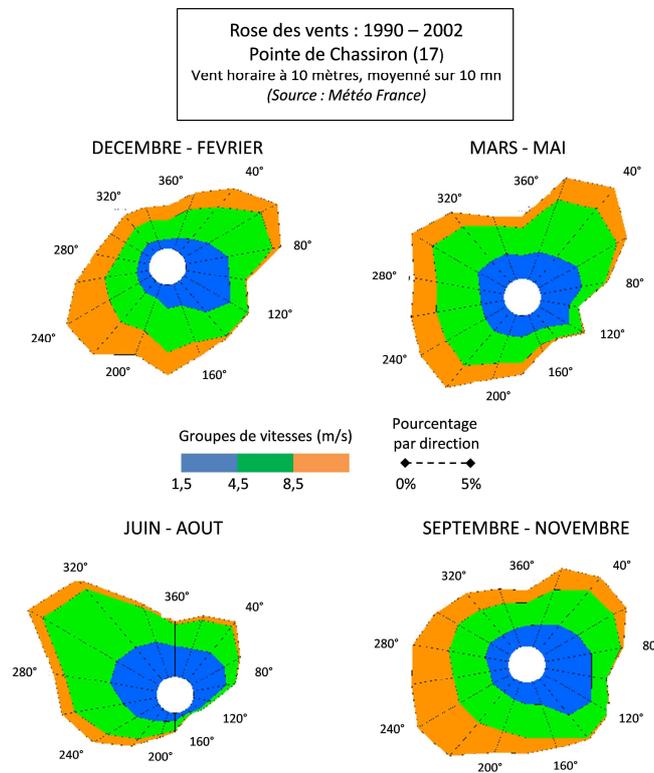


Figure II-8 : Distribution trimestrielle des vents, entre 1990 et 2002, au phare de Chassiron (source Météo-France)

II-3.2.4. Vagues (houles et clapots)

Il existe peu de données physiques disponibles relatives aux hauteurs, directions et périodes des vagues (houles ou clapots) concernant l'intérieur du bassin. Une série de photos aériennes prises en 1971 pour le compte du C.N.E.X.O montre la pénétration de la houle dans le Nord et dans le Sud du bassin. En 1994, dans le cadre de la campagne INTRMUD, une série de mesures de la hauteur des vagues réalisée à l'aide de capteurs de pression sur la vasière de Brouage a permis de mettre en évidence l'existence de clapots d'environ 0,70 m de hauteur (Bassoullet *et al.*, 2000).

Par ailleurs, lors de récentes études (Le Hir *et al.*, 2006; Robert *et al.*, 2006), des vagues de 0,20 m ont été mesurées sur le banc de Perquis (proche de Ronce les Bains) et des vagues de 0,80 m avec une période de 4 à 5 s sur le banc de Lilon (côte oléronaise). Des périodes supérieures à 10 s ont même été enregistrées pour des vents de secteur Sud-ouest soufflant à 15 ms⁻¹. Néanmoins, ces mesures ne sont pas significatives, car elles ont été faites sur de trop courtes périodes de temps et ne sont accompagnées d'aucunes statistiques. Les vagues qui se propagent dans le bassin proviennent essentiellement du pertuis d'Antioche. L'étroitesse de l'embouchure du pertuis de Maumusson et la configuration des fonds de la partie sud du bassin atténuent fortement la propagation des vagues dans cette zone. Les vagues sont responsables d'un transport de sédiment important au niveau de ces ouvertures sous l'action de dérives littorales, alors que les clapots provoquent de fortes remises en suspension sur les

vasières (Tesson, 1973). La pénétration des vagues dans le bassin dépend de la puissance et de la direction des vents :

- Les vents d'Ouest vont générer des vagues déferlantes de 0,80 m de hauteur sur la partie orientale du coureau d'Oléron. Alors que la partie occidentale ne sera que peu affectée (hauteur des vagues <0.30 m). Dans le pertuis de Maumusson, les vagues y conservent une hauteur significative de 1 m.
- Les vagues produites par vents de Sud n'ont qu'un faible impact sur les zones intertidales du bassin, bien que générant des hauteurs de 1 m dans la limite Nord.
- Les vents de Nord vont avoir un impact important sur la côte oléronaise ($h = 0.70$ m) et sur les bancs du centre du coureau d'Oléron.
- Les vents d'est, plus rares et moins intenses que pour d'autres directions, produisent des vagues d'une hauteur supérieure à 0,50 m qui affectent la côte oléronaise.

II-3.3. Conchyliculture

Cette baie est également une zone largement utilisée pour la culture des coquillages. Les parcs et structures ostréicoles occupent environ 32 km² de surface sur les zones intertidales, soit 1/5^{ème} de la surface de la baie (Gouletquer et Le Moine, 2002; Heral et al., 1989). Elle occupe le premier rang européen concernant la commercialisation des huîtres. Cette forte production provoque une pression importante sur la dynamique sédimentaire de la baie qui induit des problèmes d'exhaussement, de modification des écoulements (Robert *et al.*, 2006; Sornin, 1982; Sornin, 1984). Du fait de la biodéposition issue des mollusques cultivés (Ottman et Sornin, 1982), des modifications des propriétés physico-chimiques des fonds ont lieu.

II-3.3.1. Biomasse et répartition spatiale

Les caractéristiques hydrobiologiques et sédimentaires de la baie de Marennes-Oléron permettent une production conchylicole. La biomasse totale des huîtres oscille autour de 80 000 t depuis les années 1970 (fig. II-9). En 2001, la production annuelle de ces organismes représentait environ 38 000 t.an⁻¹. Plus d'un tiers de la production nationale d'huîtres creuses est commercialisé dans le bassin de Marennes-Oléron (Gouletquer et Le Moine, 2002).

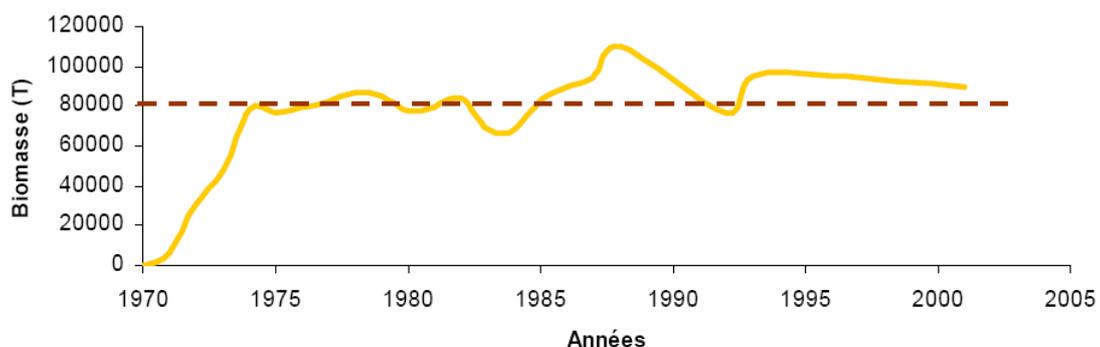


Figure II-9 : Evolution de la biomasse des huîtres (*Crassostrea gigas*) en élevage dans le bassin de Marennes-Oléron depuis 1970.

En plus du stock d'huîtres cultivées, les stocks d'huîtres « sauvages » représentent une superficie non négligeable de la baie (fig. II-10). Ces stocks représentaient en 1994 une biomasse d'environ 20 000 t (Prou, 1993). Actuellement, les stocks d'huîtres sauvages ne sont pas connus avec précision. Néanmoins, leur répartition spatiale ne semble pas avoir beaucoup évoluée depuis 1994. Les huîtres sauvages se situent dans des parcs abandonnés, sur certaines parties basses des estrans de la partie Est de l'île d'Oléron et sur la vasière de Monportail-Brouage.

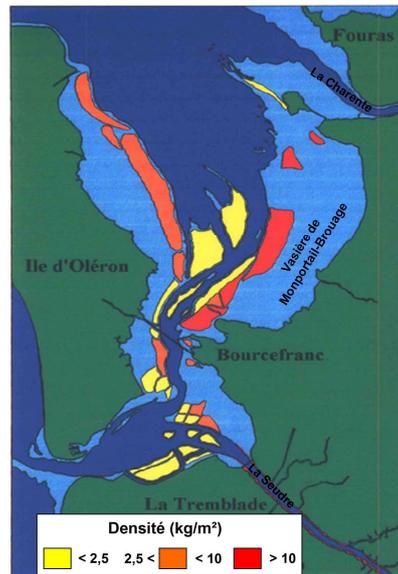


Figure II-10 : Répartition spatiale des densités moyennes d'huîtres sauvages et abandonnées dans le bassin ostréicole de Marennes-Oléron (d'après J.Prou, 1993)

II-3.3.2. Influence des huîtres sur la sédimentation

Les huîtres induisent une pression importante sur leur environnement et sur la sédimentation locale (Martin *et al.*, 1989 ; Sornin, 1981). Les mollusques bivalves filtrent l'eau de mer pour se nourrir. Les huîtres (*Crassostrea gigas*) du bassin de Marennes-Oléron retiennent les particules sestoniques d'une taille comprise entre 5 et 100 μm (Barillé *et al.*, 1997 ; Shumway *et al.*, 1985). Les palpes labiaux vont permettre à l'huître de trier ces particules. Une partie est rejetée sous forme de pseudofèces (Bernard, 1974). L'autre partie est ingérée par l'huître pour être ensuite rejetée sous forme de fèces (matière fécale). Sornin (1981) a mesuré une production de fèces et pseudofèces pouvant atteindre 45 g par gramme de chair sèche d'huîtres par mois.

L'huître enrobe d'un mucus les fèces et pseudofèces qui sont alors agrégés (Kusuki, 1978). En eau calme, la vitesse de chute de ces agrégats est 200 fois plus importante pour des tailles de 2 μm et de 20 fois pour des tailles de 3 μm (Haven et Morales-Alamo, 1968). Ces agrégats associés aux apports sédimentaires externes constituent des « biodépôts », matériaux mixtes d'origine biologique et d'origine sédimentaire, se développant rapidement autour des zones ostréicoles (Kusuki, 1978 ; Martin *et al.*, 1989). La forte concentration en éléments fins de ces « biodépôts » et leur forte teneur en matières organiques semblent renforcer leur résistance à l'érosion, par l'augmentation de leur limite d'écoulement et de leur viscosité (mesurée par la technique du Rhéostat) (Sornin, 1984).

II-3.3.3. Influence des installations conchylicoles sur l'hydrodynamisme et la sédimentation

D'après Sornin (1981), l'utilisation généralisée des installations surélevées (tables ostréicoles et bouchots de moules) pour la conchyliculture entraîne des modifications sur les écoulements et sur la sédimentation locale. La présence des tables et des bouchots provoque un ralentissement d'un facteur 2 et 3 (respectivement) des courants, ceci conduisant à une augmentation de la turbidité et de la sédimentation au niveau des installations. Cependant, d'après des études récentes (Kervella *et al.*, 2009b ; Robert *et al.*, 2006), l'ampleur de ces ralentissements est vraisemblablement à minorer.

De plus, ces installations entraînent une diminution de 30 à 50% de la hauteur des vagues (Sornin, 1981). Les tables font office d'obstacle hydrodynamique (Birben *et al.*, 2007 ; Wang et Shen, 1999) à la houle et au clapot, réduisant ainsi les phénomènes de remise en suspension des sédiments fraîchement déposés. Il est alors possible d'observer une sédimentation plus forte dans les zones conchylicoles (fig. II-11).



Figure II-11 : Action cumulée de l'effet des tables et des huîtres provoquant dépôt de vase très fluide sur le banc de Lamouroux (Marennes-Oléron, France) en octobre 2008. (Photos : S.Kervella)

II-4. Conclusions

Les caractéristiques sédimentaires et hydrodynamiques de la baie de Marennes-Oléron sont étudiées depuis près de 40 ans. Ainsi au cours des années 70-80 un certain nombre d'études généralistes s'est intéressé aux caractéristiques géographiques, hydrodynamiques et sédimentologiques de la baie. Au cours des années 90, de nouvelles études ont été réalisées, sur les caractéristiques morphodynamiques, hydrodynamiques et sédimentaire de la vasière de Brouage ; à cette période a été utilisé pour la première fois un altimètre *in situ* pour mesurer les variations de la hauteur des sédiments en fonction de l'action des vagues et des courants de marée. Puis quelques études sur les caractéristiques sédimentaires et hydrodynamiques ont été initiées sur différents sites au cours des années 2000. La baie a également fait l'objet d'études de modélisation numériques qui ont permis de mieux comprendre les particularités de son hydrodynamisme.

Ces études ont permis de dresser les grandes caractéristiques géographiques et hydrodynamiques de la baie ainsi que les premières représentations de la couverture sédimentaire des estrans. La baie apparaît comme un environnement varié, dont les zones intertidales représentent près de 58% de sa surface totale.

Malgré ces nombreuses études, il apparaît que les connaissances morpho-sédimentaires et hydrodynamiques sur les estrans de la baie restent générales et que les données acquises sur la vasière de Monportail-Brouage, lors du programme INTRMUD, ne permettent pas de comprendre le fonctionnement hydro-sédimentaire des autres estrans de la baie. De fait, de nombreuses questions restent en suspens : Quels sont les différents types de sédiments, d'un point de vue de leur nature texturale et de leur comportement mécanique, que l'on peut rencontrer sur les estrans? Quelles sont les variations saisonnières de ces faciès sous l'action des forçages naturels et anthropiques? Quelle est l'influence des forçages (courant et vagues) sur la mise en mouvements des sédiments? Quels sont les impacts des activités conchylicoles sur la sédimentation? Quelles sont les zones intertidales à faibles et fortes mobilité à l'échelle de la baie?

Compte tenu des caractéristiques hydro-sédimentaires de la baie et de ces estrans et des questions soulevées sur le fonctionnement de ceux-ci, il apparaît qu'il est important de coupler plusieurs approches, suivant plusieurs échelles de temps et d'espace, pour bien comprendre la mobilisation et le transport des sédiments des zones intertidales de la baie. La stratégie d'étude adoptée dans ce travail est présentée dans la partie suivante.

Partie III : Stratégie d'étude

III-1. Objectifs de l'étude

Dans le but de mieux comprendre la mobilisation et le transport des sédiments dans les zones intertidales de la baie, une approche pluridisciplinaire a été choisie, comportant plusieurs objectifs (fig. III-1), et couplant une étude sédimentologique, une étude hydro-sédimentaire et l'utilisation de la modélisation appliquée ; le tout suivant plusieurs échelles spatio-temporelles.

Ainsi, une grande campagne de prélèvements des sédiments superficiels a conduit à la récupération d'un large panel de matériaux. L'étude des échantillons, à partir d'analyses micro-granulométriques et rhéologiques, a permis d'identifier, en laboratoire, les différents types de sédiments de la baie, notamment au travers de la définition de leur seuil d'écoulement (ou contrainte d'écoulement significative) (objectif 1).

Parallèlement à cette campagne, l'étude des processus sédimentaires à court et moyen terme (à l'échelle d'une tempête, semi-diurne, diurne et annuelle) s'est appuyé sur le déploiement d'un grand nombre d'altimètres *in situ* et de courantomètres en plusieurs points de la baie, sur une longue période, afin de réaliser des mesures de terrain à haute fréquence et en continu des paramètres hydrodynamiques et sédimentaires. Cette étude a permis d'étudier la réponse de l'interface aux forçages (objectif 2) et d'étudier l'influence des différents forçages (hydrodynamiques, anthropiques et biologiques) sur la stabilité des estrans (objectif 3).

Enfin, pour compléter cette stratégie d'étude et afin de mieux comprendre les mécanismes hydro-sédimentaires à l'échelle de la baie (objectif 4), le modèle numérique hydro-sédimentaire SiAM-2DH appliqué à la BMO a été utilisé.

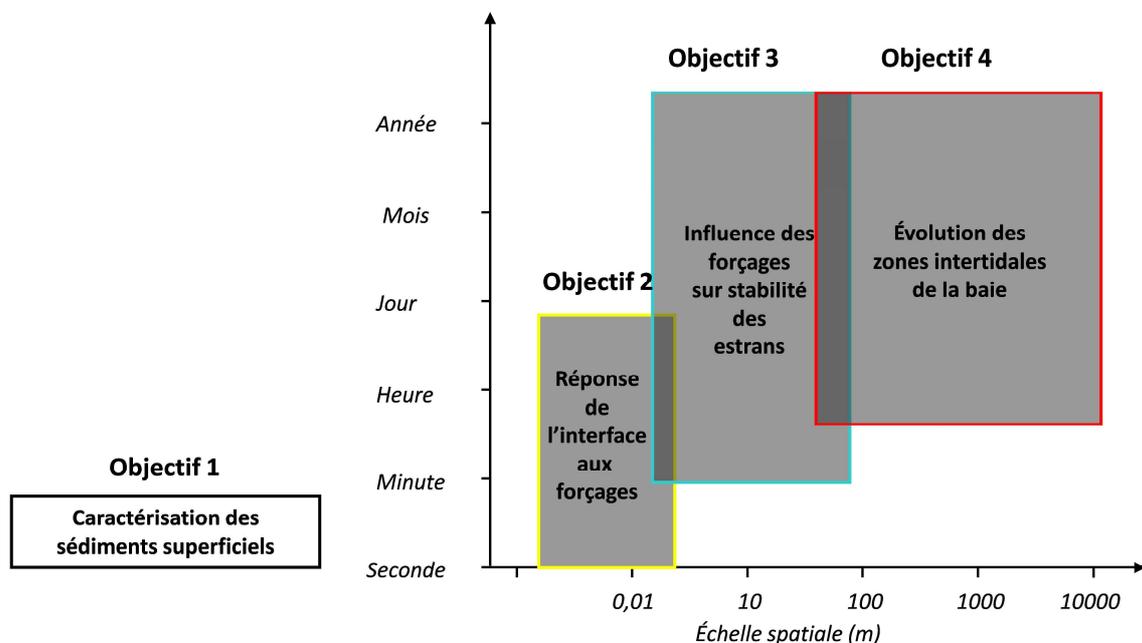


Figure III-1 : Objectifs de l'étude selon différentes échelles spatio-temporelles

NB : Dans cette étude, deux types de paramètres sont utilisés, dont la grandeur physique est proche et l'unité identique, mais dont la signification est très différente : la contrainte de cisaillement au fond et la contrainte d'écoulement significative.

La contrainte de cisaillement (*shear stress*), exprimée en N/m^2 ou Pa (unités SU), est la contrainte *hydrosédimentaire* exercée par un forçage hydrodynamique sur le fond, déduite par calcul de mesures altimétriques *in situ* (dans cette étude) et/ou de mesures par érodimétrie. C'est donc une variable « 2D » qui dépend de la vitesse d'érosion et des effets dus à la déposition, puisqu'elle s'exerce essentiellement, *via* un fluide généralement en écoulement turbulent, sur l'interface sédimentaire (quelques millimètres) : on distinguera selon le cas, différentes formulations de cette contrainte de cisaillement, pour l'érosion (τ_e) et pour le dépôt (τ_d), ainsi que leurs valeurs 'critiques' (respectivement, τ_{ce} et τ_{cd}).

La contrainte d'écoulement significative (*shear strength*) de type *rhéométrique*, exprimée également en N/m^2 ou Pa, est la contrainte réactive d'un sédiment, suite à des essais rhéologiques (quand il s'agit de mesures scissométriques, on emploie alors plutôt le terme de « résistance au cisaillement »). C'est donc un paramètre comportemental caractérisant un matériau à tel état sédimentaire (essentiellement quant à ses propriétés viscoplastiques). Cette variable est dimensionnellement « 3D », du fait qu'elle correspond à un niveau sédimentaire de l'ordre du centimètre, voire décimétrique.

Ainsi, afin d'éviter les confusions de lecture entre ces deux types de contraintes, il sera affecté par convention, dans le cette étude, le N/m^2 *hydrosédimentaire* pour les contraintes de cisaillement sur le fond et le *Pa rhéométrique* pour les contraintes d'écoulement.

III-2. Matériels et méthodes

III-2.1. Etude texturale et structurale des sédiments

III-2.1.1. Choix des sites d'étude

Les sites d'étude ont été choisis afin de représenter au mieux l'hétérogénéité des faciès sédimentaires rencontrés dans la baie de Marennes-Oléron. Un effort important de prélèvement a été fait sur l'estran de la partie centrale et occidentale du bassin, notamment dans les zones de production des huîtres (fig. III-2), peu étudiées jusqu'à présent

Sur la vasière de Monportail-Brouage, le nombre de prélèvements a été réduit. De nombreuses études, notamment le programme européen INTRMUD en 2000, ont montré, que ces sédiments conservent la même composition tout au long de l'année. Les prélèvements ont été effectués entre le mois de juin 2005 et le mois d'avril 2008 (tab. III-1).

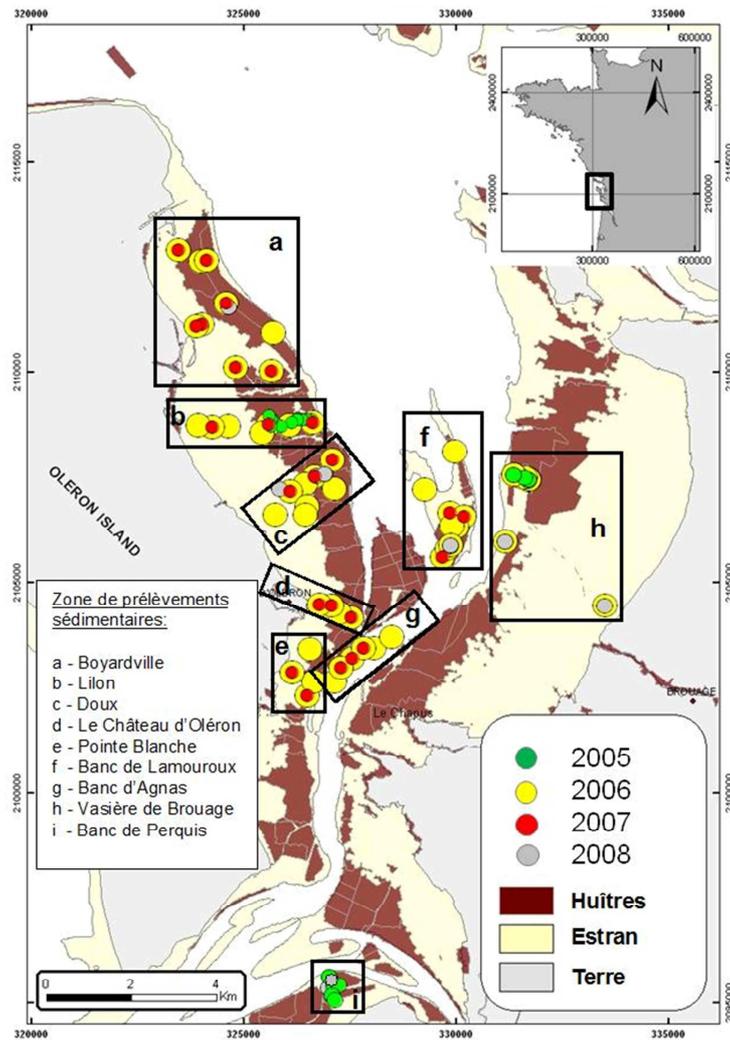


Figure III-2 : Carte des prélèvements sédimentaires superficiels au cours de l'année 2005, 2006, 2007 et de l'année 2008 en baie de Marennes-Oléron

III-2.1.2. Stratégie d'échantillonnage

Les prélèvements sédimentaires concernaient la couche superficielle de l'interface, de 0 à 2 cm de profondeur (fig. III-3.a). Cette stratégie d'échantillonnage permet d'étudier finement les caractéristiques physiques et mécaniques des sédiments superficiels. En complément, de petits carottages d'une trentaine de centimètres ont été effectués (fig. III-3.b), dans le but d'observer les évolutions de la sédimentation et de la composition des sédiments sur le moyen terme (sur plusieurs années). Les détails des campagnes de prélèvements sédimentaires sont présentés dans le tableau III-1.

- Les prélèvements de la couche superficielle : Ils ont été réalisés en 2 ou 3 niveaux (0-10 et 10-20 mm ; 0-5, 5-10 et 10-20 mm). Au droit de chaque site, les prélèvements ont été effectués par raclage, à l'émersion. Les échantillons ont été conditionnés individuellement de manière hermétique (pour limiter la perte en eau) et conservés dans un réfrigérateur afin d'éviter une dégradation rapide de la matière organique.

- Les prélèvements par carottage : Ces prélèvements ont été effectués à la fin de l'étude hydro-sédimentaire, en avril 2008, au droit des appareils de mesures altimétriques. Les carottes ont été conservées 3 jours au réfrigérateur, puis ont été ouvertes en deux demi-carottes. L'une a servi à la description des faciès par analyse d'imagerie SCOPIX (Migeon et *al.*, 1999) couplée à une analyse granulométrique et de l'activité du plomb 210. Cette étape s'est déroulée au laboratoire EPOC de l'université Bordeaux I. L'autre carotte a été utilisée pour l'étude micro-granulométrique et pour l'étude du comportement mécanique par des essais rhéométriques et scissométriques. Cependant, les essais mécaniques n'ont pas été probants, du fait de la modification de la teneur en eau des sédiments des carottes lors de leur transport. Ils ne seront donc pas présentés dans cette étude.

Les prélèvements sédimentaires ont été réalisés selon deux rythmes : un rythme saisonnier à grande échelle et un rythme quasi mensuel au droit des sites instrumentés.

- Rythme saisonnier : Pour chaque site, un prélèvement saisonnier (tab. III-1) était effectué afin de pouvoir étudier les différences de faciès sédimentaire entre deux saisons marquées par des régimes hydrodynamiques différents. Ce type d'analyse nous permet de constituer des cartes sédimentaires saisonnières des estrans.
- Rythme quasi-mensuel : Ce rythme concernait tous les prélèvements associés aux mesures hydro-sédimentaires. Sept sites ont été suivis, entre le mois d'avril 2007 et le mois d'avril 2008. Le suivi mensuel n'a pas toujours été possible sur l'ensemble de la période du fait de problèmes météorologiques et/ou logistiques.

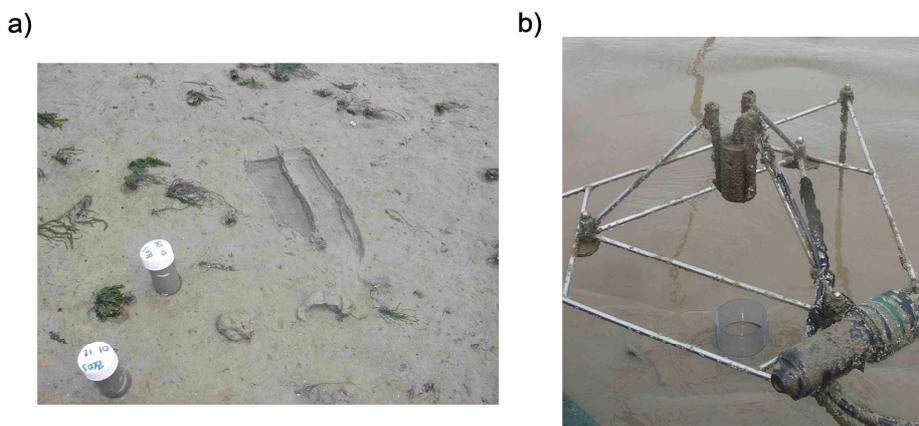


Figure III-3 : a) Prélèvements des deux premiers centimètres de sédiments superficiels, sur le banc de Lamouroux, en août 2008 ; b) prélèvements par carottage, au droit du transducteur d'un altus, sur le bas de la vasière de Monportail-Brouage, à la fin de l'étude en avril 2008. (Photos : S.Kervella)

Année	Mois	Secteur	Type de prélèvement	Rythme	Epaisseur étudiée	Nombre de sites	Total				
2005	Juin	Lilon	raclage	saisonnier	0 à 10 mm et 10 à 20 mm	13	27				
		Vasière de Brouage				6					
		Banc de Perquis				8					
2006	Juin-Septembre	Boyardville			raclage	saisonnier	0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm	9	46		
		Lilon						7			
		Doux						8			
		Le Château d'Oléron						4			
		Pointe Blanche						4			
		Banc de Lamouroux						8			
		Banc de Agnas						6			
2007	Mars-Avril	Boyardville					raclage	mensuel	0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm	6	23
		Lilon								3	
		Doux								3	
		Le Château d'Oléron	3								
		Pointe Blanche	2								
		Banc de Lamouroux	4								
		Banc de Agnas	2								
2007-2008	Tout les mois	Boyardville	raclage	mensuel	0 à 250 mm	1			8		
		Doux				2					
		Banc de Lamouroux				2					
		Vasière de Brouage				2					
		Banc de Perquis				1					
2008	Avril	Boyardville			carottage	1 fois			0 à 250 mm	1	8
		Doux					2				
		Banc de Lamouroux					2				
		Vasière de Brouage					2				
		Banc de Perquis					1				

Tableau III-1 : Détails des campagnes de prélèvements sédimentaires entre 2005 et 2008

III-2.1.3. Analyse sédimentologique micro-granulométrique

III-2.1.3.a. Analyse granulométrique

La détermination des tailles de particules a été réalisée à l'aide d'un granulomètre laser Beckman Coulter LS 13 320. La technique, indirecte, utilise le principe de diffraction et de diffusion d'un faisceau laser frappant une particule en écoulement. Il est à noter que la qualité des mesures dépend énormément de la lentille et de la longueur d'onde utilisée pour les analyses. De ce fait, les analyses doivent impérativement être faites avec le même appareil afin d'éviter toutes différences dans les mesures.

Dans notre cas, les analyses microgranulométriques ont été réalisées à l'aide d'un granulomètre laser dont la focale était de 780 nm, produisant un spectre granulométrique s'étalant de 0,4 à 2000 μm . Chaque analyse a été réalisée avec de l'eau de mer et sans additif (défloculant par exemple), afin de prendre en compte les caractéristiques physico-chimiques du milieu naturel. La signature granulométrique des sels minéraux et les micro-organismes, présents dans l'eau de mer, est effacée par la réalisation d'un « blanc » avant chaque essai. L'analyse micro-granulométrique des sédiments est obtenue après correction.

Les coupures choisies et la classification des particules se basent sur les classifications internationales USDA et ASTM. La limite supérieure des argiles est fixée à 2 μm et la limite silts-sables à 50 μm . Les sédiments peuvent être classés dans un diagramme triangulaire qui

prend en compte fractions sableuses, silteuses et argileuses, tel celui proposé par Shepard (1954), Folk (1970) ou Flemming (2000).

III-2.1.3.b. Détermination des paramètres physiques classiques

Le caractère di-phasique (eau-grain) des sédiments est décrit dans cette étude par différents paramètres physiques tels que :

- la teneur en eau massique (W), en %, est donnée par la formule suivante : $W = \frac{M_e}{M_s}$, avec M_e , la masse de l'eau et M_s , la masse solide de l'échantillon.
- la concentration massique (c), en g/l, du type $c = \rho_h = \frac{M_s}{M_t}$, dépend de la densité humide (ρ_h) et de la masse totale de l'échantillon ($M_t = M_e + M_s$).
- la fraction volumique (Φ) est déduite de la teneur en eau en considérant la densité solide ($\rho_s = 2,65$) selon l'expression : $\phi = \frac{1}{1 + \rho_s W}$.
- la fraction volumique d'un élément solide, eau ou gaz (Φ_i) dépend du volume de l'élément (V_i) et du volume total de l'échantillon (V_t), selon l'expression suivante : $\phi = \frac{V_i}{V_t}$.

III-2.1.4. Analyse radio-isotopique

Des profils radio-isotopiques de plomb 210 (^{210}Pb) ont été réalisés sur différentes carottes sédimentaires. Le ^{210}Pb a été mesuré suivant 8 niveaux (0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 9-10, 14-15 et 19-20 cm) sur les carottes provenant de la vaseière de Monportail-Brouage (site n°5 et site n°6) et sur 3 niveaux vaseux (6-7, 12-13 et 21-22 cm) sur la carotte provenant du site n°4 (Banc de Lamouroux). L'utilisation du ^{210}Pb comme traceur permet de calculer un taux de sédimentation dans des dépôts récents non remaniés.

III-2.1.4.a. ^{210}Pb dans le sédiment

Dans le sédiment l'activité du ^{210}Pb total se décompose en 2 fractions :

$$A_t = A_e + A_s.$$

A_s est l'activité "supportée" par le ^{226}Ra du sédiment qui produit continuellement du ^{210}Pb par décroissance. Ce ^{226}Ra issu lui-même de l'Uranium 238, est présent sur toute la colonne sédimentaire, et cette fraction de ^{210}Pb supportée est généralement constante en profondeur.

A_e est l'activité du ^{210}Pb en excès. C'est la part de ^{210}Pb adsorbée par les particules durant leur séjour dans la colonne d'eau et qui parvient au sédiment. Avec le temps, ce ^{210}Pb en excès décroît selon la relation de base :

$$A = A_0 \exp(-\lambda t)$$

où λ est la constante radioactive de l'isotope qui est reliée à la "période radioactive" (temps nécessaire pour que l'activité ait décru de moitié) : T, par la relation : $T = \ln 2 / \lambda$ (Pour le ^{210}Pb : $T = 22.3$ ans et $\lambda = 9.8563 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$) ; où A_0 est l'activité en ^{210}Pb en excès à l'interface eau sédiment.

Au-delà de 5 périodes (≈ 100 ans), ce ^{210}Pb en excès a totalement disparu et seul reste le ^{210}Pb supporté. La distribution du ^{210}Pb total dans le sédiment montre ainsi une décroissance logarithmique jusqu'à atteindre les valeurs du ^{210}Pb supporté constant.

III-2.1.4.b. Calcul du taux de sédimentation.

L'apport relativement constant du ^{210}Pb au sédiment et sa période de 22.3 ans en font un traceur particulièrement adapté aux processus actuels de dépôt. La quantité de matériel déposé à l'interface eau-sédiment peut être exprimée par 2 termes :

- Un taux de sédimentation linéaire ; R en $\text{cm} \cdot \text{an}^{-1}$
- Un taux de sédimentation massique ; r en $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$

La relation liant ces 2 paramètres est :

$$r = (1 - \varphi_z) * R_z * \rho_s(z)$$

, avec $\rho_s(z)$ la densité sèche et φ_z la porosité à la profondeur z (on utilise en général la valeur de $2.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ pour ρ_s).

Le taux de sédimentation linéaire ne tient donc pas compte de la compaction toujours existante. Pour un taux de sédimentation massique r, constant le taux de sédimentation linéaire R à la profondeur z s'écrit :

$$R_z = R_0 * (1 - \varphi_0) / (1 - \varphi_z)$$

, avec R_0 taux de sédimentation en surface et φ_0 porosité en surface.

Nous avons vu que l'activité du ^{210}Pb en excès : A est fonction de l'âge du sédiment et obéit à la loi de décroissance radioactive :

$$A = A_0 \exp(-\lambda t)$$

Soit F le flux de ^{210}Pb délivré au sédiment ($\text{dpm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$), l'activité à l'interface correspond à : $A_0 = F_0 / r_0$. Si le système est clos (ni perte ni apport) cette activité devient au bout d'un temps t : $A = F_t * \exp(-\lambda t) / r_t$

Si le sédiment n'est soumis à aucun mélange biologique ou physique après son dépôt, le ^{210}Pb est supposé en excès. Il est alors possible d'utiliser le modèle C.F.C.S. (Constant Flux Constant Sedimentation rate) pour calculer un taux de sédimentation. Puisque

F et r sont constants, l'activité l'est aussi : $A_0 = F / r$. Deux expressions mathématiques sont possibles suivant le paramètre recherché (taux de sédimentation linéaire ou massique) :

En fonction de R

$R = z / t$ donc $t = z / R$ en remplaçant t dans l'équation de la décroissance de l'activité on obtient :

$$A = A_0 \exp(-\lambda.z/R)$$

Un diagramme $\ln A$ en fonction de z donne une droite de pente $-\lambda/R$ qui permet de déterminer R directement.

En fonction de r

Soit m la masse de sédiment sec par unité de surface (g.cm^{-2}) on a :

$$r = m / t \text{ donc } t = m / r \text{ et } A = A_0 \exp(-\lambda.m/r)$$

Un diagramme $\ln A$ en fonction de m donne une droite de pente $-\lambda/r$ qui permet de déterminer r directement.

III-2.1.5. Analyse rhéologique

L'étude rhéologique d'un matériau permet, macroscopiquement, de déterminer des lois comportementales (ou relations constitutives), qui rendent compte de la réponse mécanique des matériaux à une contrainte. Ces lois sont établis expérimentalement à l'aide d'un rhéomètre, soit à contrainte imposée, soit à vitesse imposée. Ces relations constitutives varient en fonction de la nature et de l'état du matériau. Au regard de l'étude bibliographique, les travaux sur la rhéométrie des vases naturelles (Coussot, 1997; de Wit et Kranenburg, 1997; Khosrow, 1999; Migniot, 1968) sont peu fréquents.

Le rhéomètre permet le cisaillement de la suspension en géométrie coaxiale, en géométrie cône plan, ou encore en géométrie plan-plan. Il convient d'adapter les procédures expérimentales à chacun des fluides traités, afin de déterminer avec la plus grande précision les paramètres caractéristiques de leur comportement. Pour cela, il existe de nombreux types d'essais, dépendant entre autres de la nature des matériaux étudiés, mais également des géométries utilisées. Ils sont caractéristiques, selon les cas:

- des grandes déformations permettant de juger de la transition solide-liquide, avec notamment la détermination de la contrainte seuil et des paramètres d'écoulement (essais d'écoulement pseudo établi et établi) ;
- des faibles déformations pour la caractérisation des propriétés visco-élastiques à partir d'essais de fluage-recouvrance et pour la définition de la définition de la contrainte d'écoulement.

Cette étude s'intéresse à la transition solide-liquide du sédiment, notamment par la détermination de sa contrainte de cisaillement (ou seuil d'écoulement) qui est une contrainte dite de «restructuration». Pour cela, notre choix s'est porté sur les essais pseudo-établis.

L'interprétation des essais s'appuiera sur des travaux issus d'autres champs disciplinaires utilisant les techniques rhéométriques, telles les suspensions modèles (latex, silice, oxydes de métaux) pour lesquelles la taille de particule et les propriétés physico-chimiques (charge) sont invariantes, ainsi que les suspensions argileuses et les suspensions cimentaires (Cousot et Ancy, 1999a; Mansoutre, 2000; Morvan et al., 1994; Pignon et al., 1996; Pignon et al., 1997).

III-2.1.5.a. Principe de l'essai pseudo-établi

Les essais pseudo-établis permettent de définir rapidement sous quelle contrainte mécanique un matériau va se liquéfier et donc de déterminer la contrainte seuil associée (τ_y), appelé également seuil d'écoulement. Pour cela, des gradients de vitesse par palier, croissants (phase de montée), puis décroissants (phase de descendante) sont imposés au matériau en fonction du temps et les contraintes de cisaillement correspondantes sont mesurées (fig. III-4). Dans une certaine mesure, l'ordre de grandeur de cette contrainte peut être rapprochée de celle de la rigidité initiale définie par Migniot (1968).

Il est fréquent que l'écoulement provoqué par un gradient de vitesse ne soit pas tout à fait établi à la fin du palier, la contrainte de cisaillement ainsi mesurée étant légèrement supérieure à la contrainte établie (fig. III-4). On obtient alors une succession de couples ($\tau/\dot{\gamma}$) caractéristiques du matériau pour un temps donné jugé suffisamment long pour avoir atteint l'établissement. L'écart entre les valeurs d'équilibre obtenues à la montée et à la descente caractérise la thixotropie du fluide

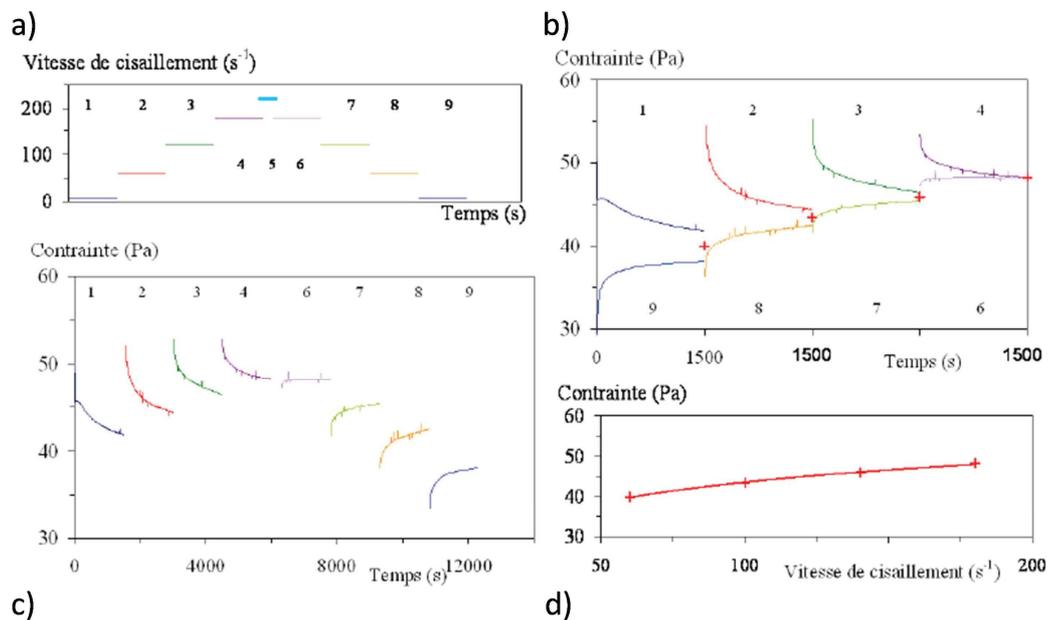


Figure III-4 : Schématisation de l'évolution des contraintes obtenue lors de l'application de paliers de vitesse de 25 min. a : paliers de vitesse de cisaillement appliqués, b : réponse en contrainte, c : déstructuration et restructuration à cisaillement constant, d : rhéogramme établi. Exemple d'une suspension à 80 PPS et 100 g/l de smectite (d'après Paumier, 2007)

III-2.1.5.b. Protocole d'analyse

L'étude rhéologique des sédiments a été réalisée à l'aide d'un rhéomètre de type Physica MCR 301 à vitesses imposées, avec une géométrie plan-plan ($\varnothing = 5\text{cm}$), un entrefer de 1 mm et une température maintenue constante de 17°C. La partie supérieure mobile de la géométrie est rainurée (250 μm) afin d'éviter les glissements aux parois.

Les sédiments prélevés sont conservés au réfrigérateur. Au moment de la réalisation des essais, ils sont débarrassés des coquilles et agités manuellement afin de les rendre homogènes. La phase de précisaillement, souvent présente dans les essais rhéométriques, a été abandonnée, considérant que l'agitation manuelle et la phase de montée lors de l'essai étaient suffisantes pour son homogénéisation. Pour réduire les phénomènes d'évaporation, surtout en été, une petite enceinte en PVC a été utilisée pour isoler de l'air ambiant. Cette méthode a été validée par des tests comparatifs, avec et sans précisaillement.

Au début de cette étude, la détermination du seuil d'écoulement était basée sur des essais en écoulement pseudo établi, dit « lent », résultant de travaux antérieurs sur les sédiments de la baie de Marennes-Oléron (Robert *et al.*, 2006 ; Kervella *et al.*, 2009a). Du fait du grand nombre d'échantillons à analyser dans le cadre de l'étude sédimentaire, un protocole plus court, dit « rapide », a été élaboré. Pour un même échantillon, les valeurs de seuils d'écoulement obtenues sont comparables, avec les deux protocoles.

Les détails des procédures des essais sont donnés dans le tableau suivant :

		1er phase (montée)	2e phase (descente)
Protocole lent	vitesse de cisaillement (s-1)	0,0001 à 200	200 à 0,0001
	durée des paliers (s)	10	10
	durée de la phase (min)	10	10
Protocole rapide	vitesse de cisaillement (s-1)	0,0001 à 10	10 à 0,0001
	durée des paliers (s)	5	5
	durée de la phase (min)	5	5

Tableau III-2 : Présentation des caractéristiques des protocoles lent et rapide définis pour étudier le seuil d'écoulement sur des sédiments naturels

Plusieurs méthodes de détermination du seuil d'écoulement (largement débattues dans les travaux de Coussot) sont rappelées dans la figure III-5. La définition de cette contrainte est ainsi souvent liée à la méthode utilisée, il convient de bien préciser, à quel endroit de la courbe, la contrainte seuil est lue :

- τ_1 et τ_2 sont des valeurs théoriques. Elles sont le résultat d'une extrapolation de la courbe d'écoulement. Ces valeurs sont utilisées si l'on fait l'hypothèse que la suspension présente un comportement de Bingham. Ces deux valeurs ne mesurent pas le même état du sédiment. τ_1 correspond à un état de déstructuration du sédiment, état

qui dépend étroitement de l'histoire de ce sédiment. τ_2 correspond à un état de restructuration instantanée, complètement différent du premier.

- τ_3 et τ_4 sont des valeurs expérimentales correspondant à des valeurs de courbes. Comme dans le cas précédent, ces deux valeurs ne mesurent pas le même état structural du sédiment.
- τ_5 et τ_6 peuvent être identifiées lorsque l'on procède à des essais à vitesse de déformation contrôlée. Ces contraintes correspondent à un maximum mesuré. On observe ce genre de contrainte pour des suspensions de nature viscoélastique à écoulement non-linéaire.

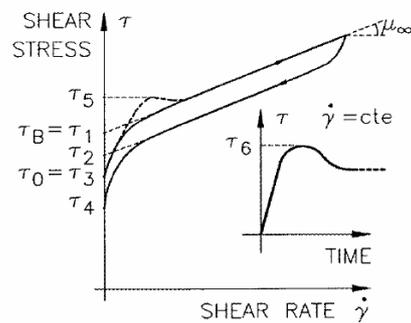


Figure III-5 : Différentes définitions possibles de la contrainte critique d'écoulement. Par extrapolation de la courbe ascendante et descendante (valeur supérieure ou de Bingham : τ_1 et τ_2 ; valeur inférieure τ_3 et τ_4). Par définition de la valeur de pic de la contrainte : en test dynamique (τ_5 - Kuijper et al., 1992), et en test statique, à faible vitesse de déformation (τ_6 - Migniot, 1968 ; Migniot et Hamm, 1990) (d'après Silva Jacinto, 2002)

Dans cette étude, le seuil d'écoulement τ_y est défini par la valeur à $0,1 \text{ s}^{-1}$ de la vitesse de cisaillement (fig. III-6), lue sur la courbe de descente (phase décroissante des vitesses), équivalent à la contrainte τ_4 représentée dans la figure III-5. Il a été montré que ce seuil de restructuration (en descente) est proche du seuil déterminé par les tests d'oscillations, souvent employés pour l'étude des suspensions (Coussot et Ancey, 1999a ; Mansoutre, 2000).

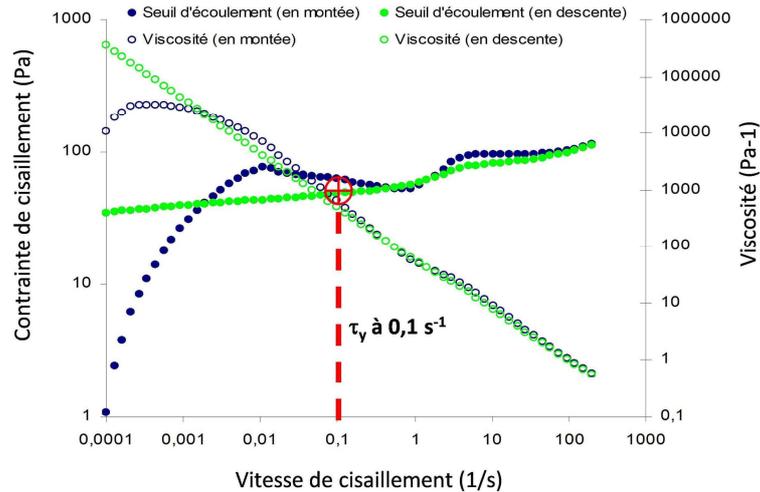


Figure III-6 : Définition de la contrainte critique d'écoulement τ_y dans cette étude pour une vitesse de cisaillement de $0,1 \text{ s}^{-1}$

III-2.2. Etude des paramètres hydro-sédimentaires sur les estrans

Afin de mieux comprendre les processus hydro-sédimentaires à court et moyen termes qui se produisent dans la Baie de Marennes-Oléron, des instruments de mesures autonomes (fig. III-7) ont été installés en avril 2007 sur 7 sites de la baie (fig. III-8 et tab. III-3), jusqu'en avril 2008. Ils permettent de mesurer la hauteur d'eau, la hauteur du sédiment, les hauteurs des vagues, la vitesse et la direction du courant, la température de l'eau, la salinité et la turbidité.

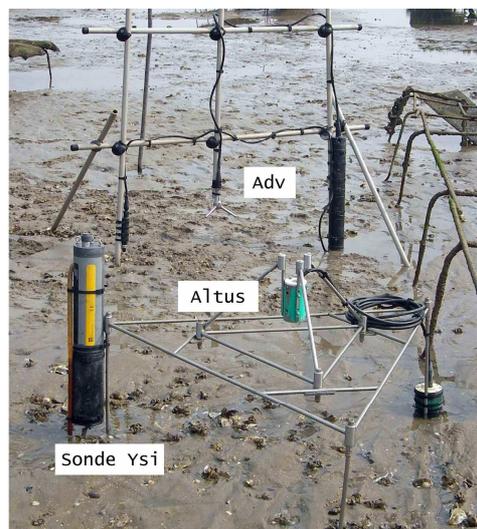


Figure III-7 : Site d'étude type comportant l'ensemble des appareils de mesures autonomes déployés entre avril 2007 et avril 2008 (Site n°3, les Doux bas). (Photographie: S.Kervella)

III-2.2.1. Description et localisation des sites d'étude

N°	Nom	Localisation et description
1	Boyardville	Il est situé à la limite entre des concessions ostréicoles et des bouchots. La zone dans laquelle l'appareil a été installé est quasiment abandonnée. Au début des mesures, les sédiments de surface étaient sableux avec beaucoup de débris coquilliers.
2	Doux haut	Il se situe sur la partie haute du platier, au milieu d'une zone plate dans laquelle les herbiers à zostères se développent au cours du printemps et de l'été. Il n'y a pas d'activité humaine dans ce secteur et le sédiment est constitué de sables fins au début de la campagne de mesures.
3	Doux bas	Il est situé au milieu d'une zone ostréicole active, dans la partie basse du platier. Les appareils ont été installés dans un secteur dans lequel il n'y a pas eu d'installation ostréicole au cours de la campagne de mesures. Ce point n'est donc pas représentatif de la sédimentation directement induite par la culture des huîtres, mais aide à mieux comprendre les phénomènes de sédimentation qui ont lieu en dehors des concessions d'élevages.
4	Lamouroux	Il se situe au centre de la partie Nord de la baie. C'est un banc sableux utilisé de manière intensive pour la culture des huîtres sur table, entre juin et décembre. Les tables sont présentes sur la partie Sud du banc et sur sa branche Est, le reste étant laissé à l'état naturel.
5	Brouage bas	Il est situé sur la partie basse de la vasière de Brouage, entre les premières lignes d'huîtres abandonnées et le coureau d'Oléron. Il s'agit d'une zone plate constituée de sédiments vaseux très fluides
6	Brouage haut	Il est situé sur la partie haute de la vasière de Brouage. Il n'y a pas de structure en banquettes-seillons dans cette zone, qui se situent plus en aval sur la vasière. En revanche, il est possible d'y observer les prémices de ces structures. Le sédiment est constitué de vase fluide à consolidée.
7	Perquis	C'est un banc sableux, situé au sud de la baie de Marennes-Oléron, entre le chenal de la Garrigue au Nord et une coursière au sud. La partie ouest du banc est occupée une grande partie de l'année (juin-décembre) par des tables ostréicoles. L'Est du banc est dédié à la production d'huîtres à plat.

Tableau III-3 : Description des sites d'étude hydro-sédimentaire

NB : Les données altimétriques du site n°7 (Perquis) ne seront pas présentées, car de nombreux doutes et incertitudes existent sur leur validité (toutefois, elles sont consultables dans l'annexe 3). Seules, les mesures de pression enregistrées à partir de l'altimètre installé sur ce site seront utilisées pour la validation du module de houle du modèle numérique SiAM-2DH (cf. part. VII-2.)

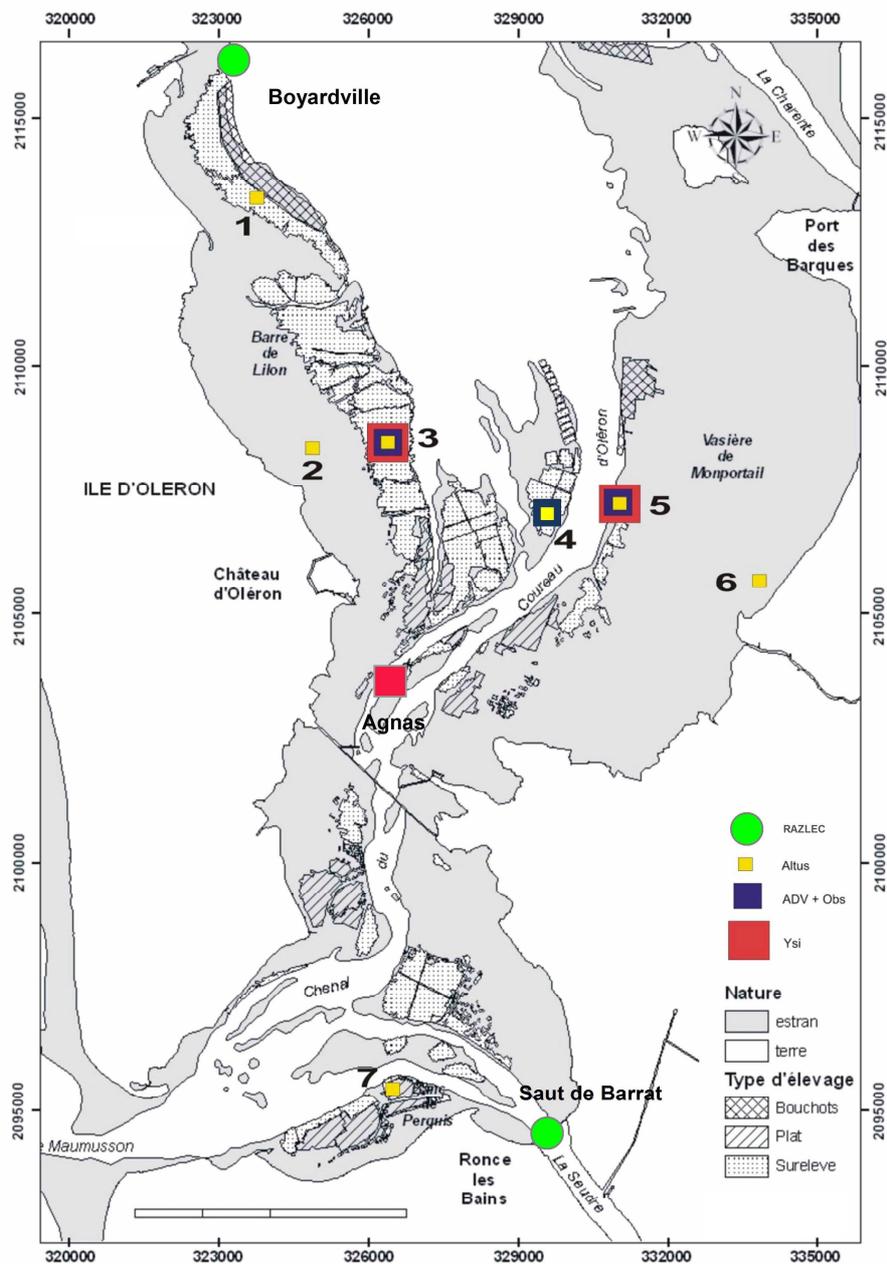


Figure III-8 : Carte de positionnement des appareils de mesures (altimètres ALTUS, courantomètres ADV, sondes multiparamètres YSI) en fonction des sites d'étude (n°1 à 7) de la baie de Marennes-Oléron et position des points RAZLEC qui ont permis d'obtenir des informations sur la température, la salinité et la turbidité de l'eau

Les périodes d'installations des appareils de mesures hydro-sédimentaires sont indiquées dans le tableau suivant :

Site	Instrument	Période de mesures
1	ALTUS	06/04/07 - 08/04/08
2	ALTUS	04/04/07 - 08/04/08
3	ALTUS	04/04/07 - 07/04/08
	ADV	17/03/07 - 02/05/08
4	ALTUS	15/06/07 - 07/04/08 (bout de table)
	ALTUS	17/07/07 - 22/02/08 (sous table)
	ADV	25/01/07 - 11/12/07
5	ALTUS	05/04/07 - 10/04/08
	ADV	05/04/07 - 03/05/07
6	ALTUS	05/04/07 - 09/04/08
7	ALTUS	19/04/07 - 10/04/08

Tableau III-4 : Périodes de mesures pour chaque site, en fonction des appareils hydro-sédimentaires utilisés

III-2.2.2. Mesures hydro-sédimentaires

III-2.2.2.a. Système altimétrique ALTUS

L'ALTUS est un altimètre immergeable à ultrasons (Jestin *et al.*, 1998) qui permet d'enregistrer, avec précision (+/- 2 mm, entre 20 et 70 cm de distance au fond) à haute fréquence et en continu, les variations du niveau sédimentaire afin de qualifier un dépôt ou une érosion (fig. III-9). Il est composé d'un échosondeur et d'un module d'enregistrement contenant la mémoire de l'appareil, les batteries et un capteur de pression à membrane, servant à la fois d'interrupteur et permettant la détermination de la hauteur et de la période des vagues.

La détermination de l'altitude du sédiment s'effectue par le calcul du temps de trajet aller-retour d'une onde acoustique émise par l'appareil, entre l'appareil et le fond. L'appareil enregistre la distance du transducteur à la cible (le fond sédimentaire), pour plusieurs niveaux d'échos (niveaux d'énergie acoustique), ainsi que les variations de la hauteur d'eau.

Les mesures des variations altimétriques du fond sédimentaire ont été faites à l'aide de 8 systèmes autonomes de mesures (ALTUS), installés sur les 7 sites, entre 7 et 12 mois (tab. II-4). Les altimètres avaient été configurés pour fonctionner avec trois voies, avec pour seuils 90, 45 et 25 mV (BES1, BES2 et BES3).

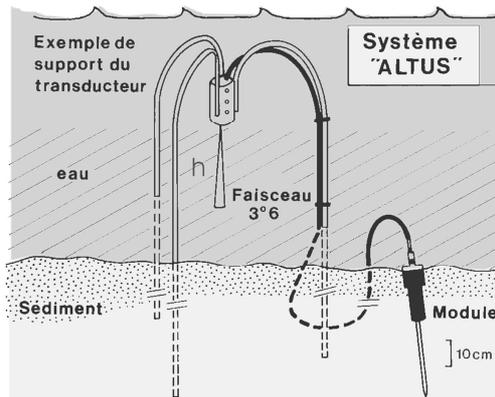


Figure III-9 : Schéma descriptif du système autonome altimétrique ALTUS (source Ifremer)

Afin d'éviter des mesures hors de l'eau et dans un souci d'optimisation de l'autonomie des appareils, ces derniers ont été configurés pour effectuer des mesures uniquement lorsque l'épaisseur d'eau au-dessus du capteur de pression était supérieure à 40 cm. Les échosondeurs étaient placés sur des bâtis triangulaires, entre 25 et 40 cm au-dessus du fond. Les modules d'enregistrement étaient enfouis dans le sédiment, dépassant de quelques centimètres afin que les capteurs de pression ne soient pas recouverts par des apports sédimentaires importants.

L'estimation de la distance entre l'émetteur et le fond étant basée sur la vitesse de propagation des ondes dans l'eau, il est nécessaire d'effectuer une correction de cette vitesse à l'aide des variations de la température du milieu (Deloffre, 2005) (fig. III-10).

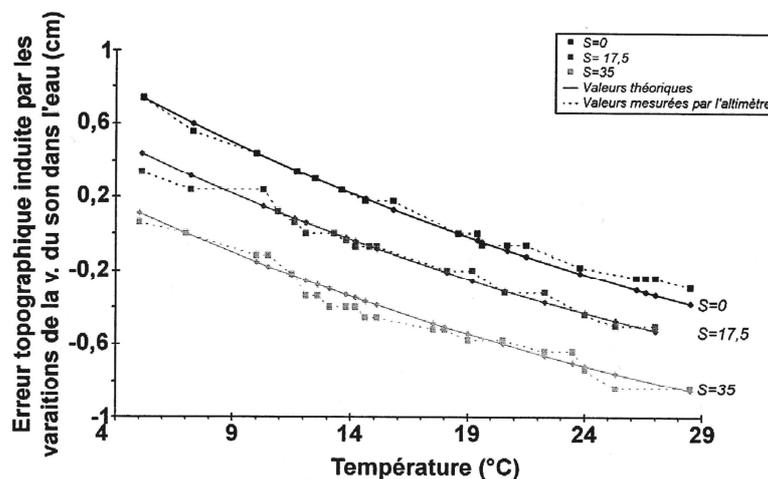


Figure III-10 : Erreur topographique induite par les variations de la vitesse du son dans l'eau, suivant les variations de la salinité et de la température du milieu. Comparaison des données théoriques (équation de Coppens) et des résultats expérimentaux. (d'après Deloffre, 2005)

Ces calculs sont nécessaires du fait de grandes variations de ces paramètres au cours de l'année (fig. III-11).

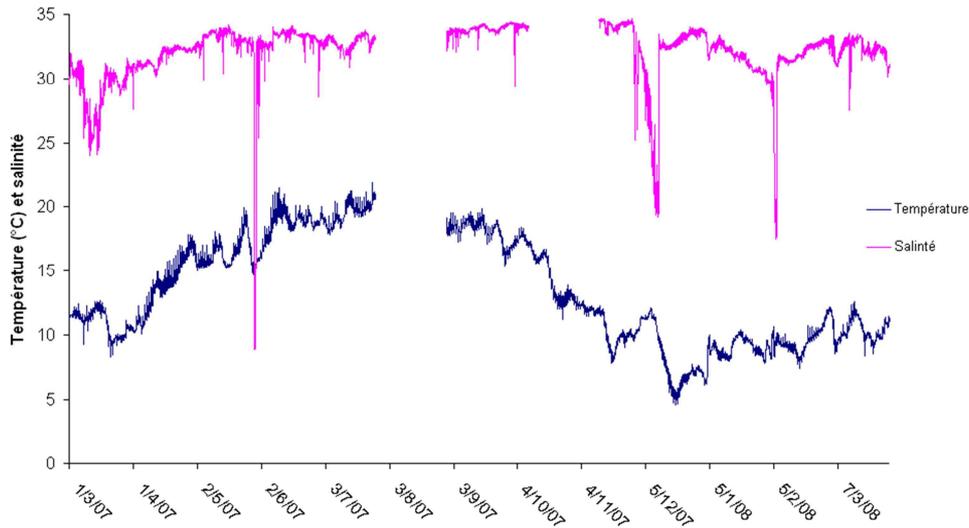


Figure III-11 : Données de température et de salinité enregistrées sur le banc d'Agnas, entre le 1^{er} mars 2007 et le 1^{er} avril 2008

Les mesures altimétriques présentées par la suite seront donc corrigées à l'aide de l'équation de Coppens (1981) qui prend en compte la température et salinité de la colonne d'eau. La correction de la vitesse du son (V_{son}) se fait selon l'équation suivante :

$$V_{son} = 1449,05 + 4,57T - 0,0521T^2 + 0,00023T^3 + (1,333 - 0,0126T + 0,00009T^2)(S - 35)$$

où T est la température en degrés celsius et S la salinité.

En plus de la mesure de hauteur du sédiment, les ALTUS étaient tous équipés de capteurs de pression situés sur les modules d'enregistrement, permettant l'enregistrement des variations de la hauteur d'eau. Le post-traitement des données de pression permet de déterminer la hauteur, les périodes et les tensions de cisaillement des vagues près du fond. Il est également possible de faire la distinction entre des vagues courtes et des vagues longues, en procédant à une coupure de fréquence.

III-2.2.2.b. Courantomètre de type ADV

Le courantomètre ADV (ici, le Vector de chez Nortek) permet de mesurer à haute fréquence (jusqu'à 64 Hz) la vitesse, la direction du courant et l'énergie turbulente maximale de l'écoulement (Simpson *et al.*, 2005). C'est un sonar bistatique, c'est-à-dire qu'il utilise des récepteurs et un émetteur séparés, qui permet de déterminer la vitesse de l'écoulement en utilisant l'effet Doppler par l'émission d'une courte impulsion acoustique. Cette onde est réfléchiée par les particules en suspension, la différence de fréquence du signal de retour par rapport au signal émis permettant de déterminer la composante axiale de la vitesse de l'écoulement ($m.s^{-1}$), du fait que la vitesse des particules est assimilée à celle de l'écoulement. Le Vector va mesurer les vitesses de l'écoulement à 157 mm du transmetteur, dans un volume d'eau défini par l'intersection des signaux de retour.

A l'aide des trois capteurs de réception et du compas interne de l'appareil, la direction de l'écoulement peut être donnée dans le système ENU (East, North et Up). Le post traitement des données de vitesses instantanées permet de déterminer le courant moyen, les vitesses

orbitales, les tensions de cisaillement près du fond (courant seul, vagues seules ou vagues+courant). L'utilisation de l'intensité acoustique rétrodiffusée permet, après calibrage, d'estimer la concentration en matières en suspension près du fond. Des routines Matlab ® ont également été développées au sein de l'Ifremer pour automatiser ce traitement.

Ces instruments ont été positionnés sur des structures en aluminium près des appareils de mesure altimétrique, perpendiculairement au courant (fig. III-12) afin de réduire fortement les phénomènes d'interactions entre l'écoulement et la structure (Deloffre, 2005; Verney, 2006). Les mesures de la vitesse du courant ont été réalisées à 5 cm du fond.



Figure III-12 : Courantomètre ADV géopositionné par DGPS, sur sa structure en aluminium, sur le banc de Lamouroux, en novembre 2007. (Photographie : S.Kervella)

III-2.2.2.c. Paramétrages des appareils hydro-sédimentaires

Le paramétrage des appareils de mesures hydro-sédimentaires, en fonction des cycles étudiés (semi-diurne, diurne et annuel), est décrit dans le tableau III-5. Les fréquences d'acquisition choisies pour les courantomètres et les altimètres permettent de suivre avec précision les mécanismes d'érosions/dépôts en relation avec l'agitation locale (vagues), mais aussi ceux liés à l'intensité des courants de marée.

Appareil	Paramètres mesurés	Fréquence d'acquisition (Hz)	Durée de la mesure (min)	Intervalle entre les mesures (min)	Cycle étudié
Altimètre (ALTUS)	Hauteur du sédiment	2	5	20	Semi-diurne diurne annuel
	Hauteur d'eau				
	Hauteur des vagues				
Courantomètre (ADV)	Vitesse du courant	4	8	14	Semi-diurne
	Direction du courant				
	Hauteur d'eau				
	Hauteur des vagues				

Tableau III-5 : Paramétrages des altimètres (ALTUS) et des courantomètres (ADV), types de mesure et cycles étudiés

III-2.2.2.d. Détermination de la contrainte de cisaillement des courants et/ou des vagues sur le fond

Les contraintes de cisaillement des courants et/ou des vagues sur le fond seront déterminées, dans notre étude, à l'aide des données issues de courantomètres acoustiques de type ADV (Nortek) et d'altimètres de type ALTUS (NKE). De nombreuses méthodes de

calcul existent pour la détermination de ces contraintes. Seules celles utilisées dans ce travail seront détaillées. L'ensemble de ces calculs a été possible grâce à l'utilisation des routines de calculs (sous Matlab) des paramètres des vagues et des courants, développées au sein de l'Ifremer par R. Verney.

⇒ Détermination de la contrainte de cisaillement des courants de marée sur le fond

Il existe plusieurs approches pour déterminer la tension critique de cisaillement du courant sur le fond. La plupart de ces méthodes (τ_{\log} , τ_{viscous}) sont basées sur la vitesse de l'écoulement moyen (U), sur la vitesse de frottement du courant (u^*) et/ou sur la détermination d'une longueur de rugosité (z_0). Selon Verney and al., (2007), la méthode la mieux adaptée pour déterminer les contraintes de frottement des courants et des vagues sur le fond est la méthode TKE (Turbulent Kinetic Energy), car l'analyse spectrale de la vitesse instantanée fournit les caractéristiques de la turbulence mais également celles des vagues (Soulsby and Humphery, 1990). Cette méthode est basée sur la séparation de la variance de chaque fluctuation des composantes de la vitesse u' , v' et w' induite par les vagues (u'_w , v'_w , w'_w) et par la turbulence (u'_t , v'_t , w'_t).

La tension de cisaillement TKE (τ_{TKE}) est déterminée à partir de l'énergie cinétique turbulente K , tel que (Dyer *et al.*, 2004; Soulsby, 1983; Verney *et al.*, 2007) :

$$\tau_c = \tau_{\text{TKE}} = C_{\text{TKE}} \rho K$$

, C_{TKE} étant une constante fixée à 0,19 (Soulsby, 1983), et K étant l'énergie cinétique turbulente.

L'énergie cinétique turbulente est déterminée à partir des composantes tridimensionnelles de la vitesse de l'écoulement (u' , v' et w') :

$$K = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

avec u' , v' et w' les composantes horizontales et verticales de la vitesse turbulente de l'écoulement (m/s).

⇒ Détermination de la contrainte de cisaillement des vagues sur le fond

Les ALTUS et les ADV étant tous équipés de capteurs de pression, il a été possible d'enregistrer le signal de marée ainsi que celui des vagues, entre le mois d'avril 2007 et le mois d'avril 2008. La fréquence d'acquisition des appareils était réglée à 2 Hz pour les altimètres ALTUS et 4 ou 8 Hz pour les courantomètres ADV. Ces fréquences nous ont permis d'enregistrer un large spectre de période des vagues. Dans le cas de spectres de vagues bi-modaux, il a été procédé à la séparation des vagues courtes et des vagues longues en appliquant une fréquence de coupure de 6 s.

- *Longueur de rugosité*

En milieu naturel, comme dans le cas d'une baie ou d'un estuaire, le fond est très rarement lisse. Les aspérités et reliefs qui le composent produisent une certaine rugosité, perturbant l'écoulement. Des tourbillons peuvent alors se développer, et l'écoulement devient

turbulent près du fond. L'intensité turbulente de l'écoulement conditionne les mécanismes sédimentaires (érosion/dépôt), en faisant varier la contrainte de cisaillement.

Le calcul de la tension de cisaillement des vagues sur le fond (τ_w) faisant intervenir la longueur de rugosité (z_0), il est important de déterminer cette dernière. La longueur de rugosité (z_0) est un paramètre de longueur caractéristique relié à l'effet de rugosité d'une paroi dans un flux complètement turbulent. Elle est, par définition, la hauteur (z_0), au-dessus du fond, du plan où s'applique la condition d'adhérence (c'est-à-dire où le vecteur courant moyen est égal au vecteur nul). Elle dépend de la nature du fond et est définie par l'ensemble des rugosités que sont la rugosité du grain (k_g), la rugosité de ride (k_r), la rugosité de forme (k_h) ainsi que la rugosité induite par le mouvement du sédiment (k_m) (Nielsen, 1992; Trembanis et al., 2004; Xu et Wright, 1995). La longueur de rugosité est exprimée suivant la formule empirique suivante :

$$z_0 = \frac{k_g + k_r + k_m + k_h}{30}$$

A l'aide de mesure en canal hydrodynamique, Soulsby (1997) a pu estimer des valeurs du z_0 pour différents types de sédiments. Ces valeurs sont résumées dans le tableau suivant :

Type de sédiment	Vase	Vase/Sable	Silt/Sable	Sable (sans rides)	Sable (avec rides)	Sable/Coquille
z_0 (mm)	0,2	0,7	0,05	0,4	6	0,3

Tableau III-6 : Exemples de valeurs moyennes de la longueur de rugosité pour différents types de sédiments (Soulsby, 1997)

Le choix d'une rugosité plutôt qu'une autre, lors du traitement de données de courant ou de houle en milieu naturel, est important. En effet, en milieu naturel, la morphologie du fond peut évoluer rapidement et sa composition peut également changer. La rugosité intervenant dans les calculs de contraintes des vagues, un mauvais choix de valeur de ce paramètre peut entraîner des différences significatives dans les contraintes calculées. Ceci a pour conséquence que la sélection finale d'une longueur de rugosité, qui sera appliquée pour la détermination des contraintes de fond (vagues et/ou courant) sur une longue période temporelle, sera le fruit d'un compromis et devra être mûrement réfléchi. Dès lors, l'ensemble des contraintes de fond qui seront calculées par la suite correspondront à des contraintes relatives.

- *Hauteur des vagues et vitesse orbitale*

La hauteur des vagues peut être définie selon plusieurs formulations. Les plus utilisées sont la hauteur significative (H_s) et la hauteur moyenne (H_{rms}). La hauteur significative des vagues (H_s) a été choisie dans cette étude car ce paramètre rend mieux compte des hauteurs maximales qui peuvent être mesurées. H_s correspond à la moyenne du tiers supérieur de l'ensemble des vagues observées durant une mesure, avec m_0 , la variation de la hauteur de la surface libre.

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4\sqrt{\int S_p(f)df} \cong 4\sqrt{\sum S_p(fi)\Delta fi}$$

avec S_p la densité spectrale de pression (corrigée de l'atténuation de profondeur) et m_0 est la variance de l'élévation de la surface de l'eau.

Le spectre de la vitesse orbitale au-dessus de la couche limite inférieure peut être calculé à partir du spectre de pression (Wiberg et Sherwood, 2008) :

$$S_{uv}(f_i) = \frac{\omega_i^2}{\sinh^2(k_i h)} S_p(f_i)$$

où ω est la pulsation, k le nombre d'onde, h la profondeur d'eau et f la fréquence des vagues. Une vitesse orbitale représentative près du fond est alors déduite :

$$U_{br} = \sqrt{2} \left(\sum_i \left[\frac{4\pi^2}{T_i^2 \sinh^2(k_i h)} S_{uv}(f_i) \Delta f \right] \right)^{\frac{1}{2}}$$

- *Périodes des vagues*

De nombreuses formulations existent pour le calcul de la période des vagues. Parmi celles-ci, il y a la période de pic (T_p), la période moyenne (T_m), la période par le passage au niveau moyen (T_z) ou encore la période représentative des vagues (T_r).

Dans cette étude la définition de la période représentative (T_r) sera utilisée, car elle permet de mieux rendre compte de l'étalement des périodes lors des épisodes de tempêtes. En effet, au cours d'une tempête, le spectre des périodes des vagues est très large. L'utilisation de la période représentative permet d'éliminer les valeurs extrêmes qui pourraient, dans les calculs de contraintes des vagues, ne pas rendre compte de la diversité des vagues.

L'utilisation de T_r nous permet également de procéder à des coupures dans le spectre des périodes afin de distinguer les vagues courtes (sw) des vagues longues (lw). Dans cette étude, la différenciation entre les deux types de vagues sera faite pour $T_r = 6$ s.

La période représentative des vagues (T_r) est calculée à partir du spectre de vitesse, selon Madsen (1994) par :

$$T_r = \frac{1}{f_r} = \frac{\sum S_{uv}(f_i) \Delta f_i}{\sum f_i S_{uv}(f_i) \Delta f_i}, \text{ avec } S_{uv} = S_u + S_v.$$

où S_{uv} correspond au spectre de densité des composantes de la vitesse horizontale.

Dans le cas des vagues présentant des longueurs d'ondes différentes, c'est-à-dire lorsque plusieurs types de vagues sont présentes (courtes et longues), T_m et T_z sont représentatives des vagues courtes. Les périodes représentatives T_r et T_z (au fond) sont équivalentes et représentatives des vagues longues.

- *Tension de cisaillement par les vagues sur le fond*

Pour terminer, la tension de cisaillement générée par les vagues sur le fond est calculée à partir des vitesses orbitales (U_{br}) et des périodes représentatives des vagues (T_r), en fonction de la longueur de rugosité (z_0) sur le fond. Cette tension est exprimée par la formule suivante (Soulsby, 1997) :

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_{rw} U_{br}^2, \text{ avec } f_{rw} = 1,39 \left(\frac{U_{br} T_r}{2 \pi z_0} \right)^{-0,52}$$

où f_w correspond au facteur de frottement des vagues, dépendant des caractéristiques turbulentes de l'écoulement.

- ⇒ Modifications des contraintes de frottements sur le fond induites par la superposition des vagues et du courant

Soulsby *et al.*, (1993) ont proposé une formulation pour estimer les tensions de cisaillement induites par les vagues et les courants (τ_{wc}) à partir des tensions de cisaillement des courants seuls (τ_c) et des vagues seules (τ_w). Ils ont introduit un terme adimensionnel qui permet de prendre en compte les interactions non linéaires qui existent entre les vagues et les courants moyens à l'échelle des vagues (τ_m) :

$$\tau_m = \tau_c \left(1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_w + \tau_c} \right)^{3.2} \right)$$

$$\text{et donc } \tau_{wc} = \sqrt{(\tau_m + \tau_w \cos(\Psi))^2 + (\tau_w \sin(\Psi))^2}$$

, avec Ψ , l'angle entre les vagues et le courant. En considérant que $\tau_{TKE} = \tau_m$, la tension critique de cisaillement totale (τ_{wc}) s'écrit alors :

$$\tau_{wc} = \sqrt{(\tau_{TKE} + \tau_w \cos(\Psi))^2 + (\tau_w \sin(\Psi))^2}$$

Le calcul des tensions de cisaillement total (τ_{wc}) sera déterminé à partir des données issues des courantomètres ADV.

III-2.2.3. Suivi de la matière en suspension, de la salinité et de la température

Les données de température, salinité et turbidité du bassin de Marennes-Oléron, entre le mois d'avril 2007 et le mois d'avril 2008 proviennent notamment du réseau de surveillance RAZLEC d'Ifremer (fig. III-7), au point Boyard ville (basse fréquence), Banc d'Agas (haute fréquence) et saut de Barrat (basse fréquence).

Deux sondes multiparamètres (YSI) à haute fréquence (turbidité, température et salinité) ont été installées en complément sur les stations 02 et 05 entre avril 2007 et mai 2007, puis au mois de janvier 2008 sur ces mêmes points. Les paramètres mesurés, les fréquences d'acquisition et les périodes de mesure sont décrits dans le tableau III-7.

Lieu	Mesure	Fréquence de mesure	Période de mesure	Paramètres mesurés
Boyardville	Manuelle	2/mois	2007-2008	T, S, turbidité
Site n°3 (Doux bas)	Automatique	1/10 min	05/04/07 - 03/05/07 14/01/08 - 20/02/08	T, S, turbidité pression
Site n°5 (Brouage bas)	Automatique	1/10 min	06/04/07 - 04/05/07 10/01/08 - 29/02/08	T, S, turbidité pression
Banc d'Agnas	Automatique	1/10 min	2007-2008	T, S, turbidité pression
Saut de Barrat	Manuelle	2/mois	2007-2008	T, S, turbidité

Tableau III-7 : Récapitulatif des paramètres enregistrés (T, S, turbidité) et périodes de mesures (Avril 2007 à Avril 2008)

Il est également possible d'utiliser un ADV pour déterminer la turbidité, en l'absence de turbidimètres classiques. L'utilisation de l'amplitude du signal de retour (SNR : Signal Noise to Ratio) sur chaque récepteur acoustique peut permettre de déterminer la quantité de matière en suspension (Kawanisi et Yokosi, 1997 ; Verney, 2006 ; Voulgaris et Meyers, 2004). La mesure de signal sur bruit (SNR) dépend de la concentration en particules, supposée homogène, dans le volume étudié. Ainsi, il est possible de corréler la relation SNR et concentration en matières en suspension (MES). Cependant, la mesure du SNR dépend de la granulométrie, mais aussi de la distribution en classes des MES. Il est donc indispensable de procéder à un calibrage des courantomètres avec des sédiments issus de la zone d'étude (Voulgaris et Trowbridge, 1998).

Dans le cadre de cette étude, il a été réalisé un calibrage, dont les mesures sont représentées sur la figure III-13, à partir de sédiments naturels provenant de la vasière de Monportail-Brouage (points rouges) selon la méthode décrite par Verney (2006).

ADV - Etalonnage MES

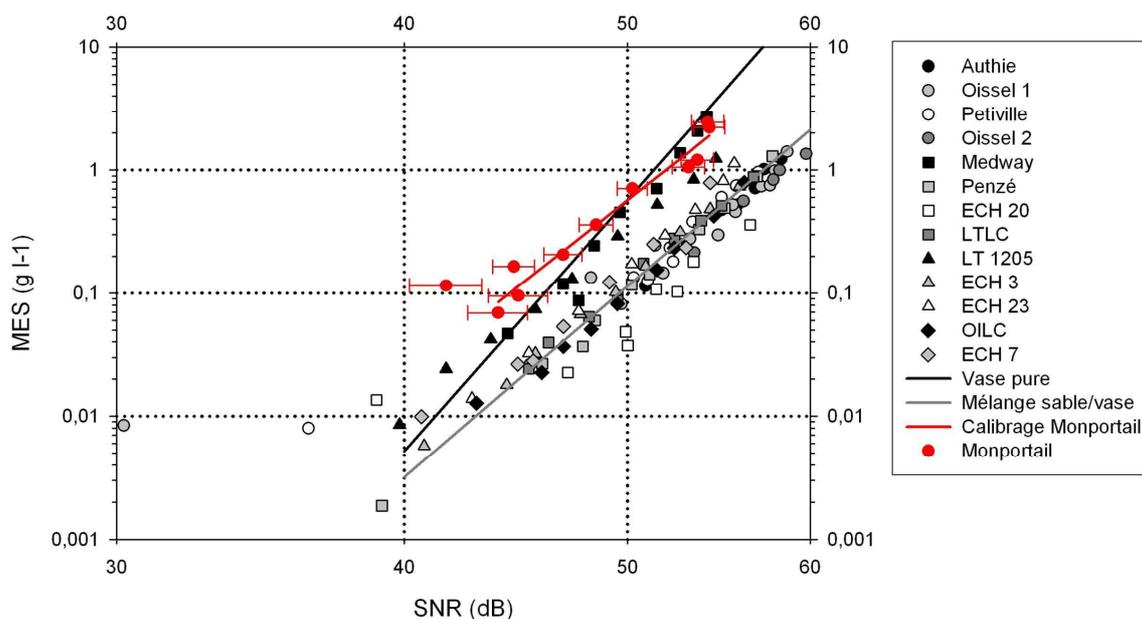


Figure III-13 : Relation SNR/MES pour différents types de vases naturelles d'après Verney (2006). Ces relations sont complétées par celles concernant la vase de Marennes-Oléron (en rouge)

III-2.2.4. Caractéristiques des vents locaux au cours de l'étude hydro-sédimentaire

Les directions et vitesses de vents (moyennes et maximales), entre le 1^{er} avril 2007 et le 5 avril 2008, proviennent des mesures réalisées, toutes les 3 heures, par Météo France, au niveau du phare de Chassiron (Extrémité Ouest de l'île d'Oléron) (fig. III-14).

La représentation de ces enregistrements sous la forme d'un hodographe permet une visualisation vectorielle des vitesses. Ceci permet d'identifier clairement des directions préférentielles des vents sur des périodes plus ou moins longues.

Ainsi, au cours de l'étude hydro-sédimentaire, les vents de secteur Ouest à Nord-ouest sont dominants entre le mois de mai et le mois d'août 2007. A partir du mois de septembre, les vents s'orientent préférentiellement au secteur Nord-est à Est, jusqu'au mois de décembre. Ensuite pour le mois de janvier 2008, les vents sont de tendance Sud. En février, ils sont plutôt Est, puis pour le mois de mars 2008, de secteur Ouest. Six tempêtes de forte intensité (vent moyen > 18 m/s) ont frappé la côte charentaise au cours de l'étude : le 18 et le 27 mai 2007, le 2 et 9 décembre 2007 et enfin le 3 et 10 mars 2008. Les détails des conditions de vents, au cours de l'étude, sont présentés dans l'annexe 2.

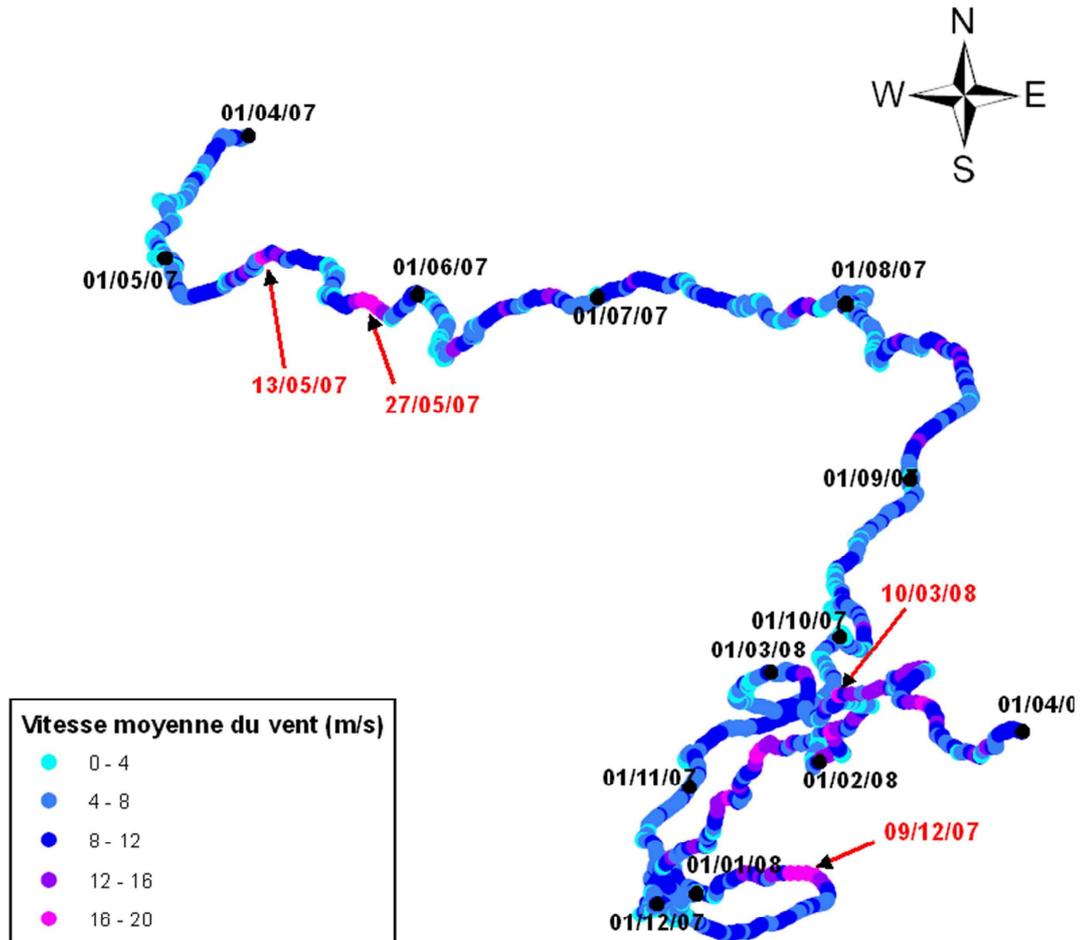


Figure III-14 : Hodographe de la direction des vents entre le 1er avril 2007 et le 5 avril 2008, au niveau du phare de Chassiron, à la pointe de l'île d'Oléron

III-2.3. Le modèle hydrosédimentaire SiAM-2DH

Pour mieux comprendre l'évolution des estrans à l'échelle de la baie, l'utilisation du modèle numérique hydro-sédimentaire SiAM-2DH appliqué à la BMO a été nécessaire. Dans cette partie, le modèle hydrosédimentaire SiAM-2DH (**S**imulation d'**A**dvection **M**ultivariable **2** Dimension **H**orizontale) n'est pas décrit, seuls les paramètres de simulations spécifiques à l'environnement de la baie le seront.

Ce modèle résout les équations de Navier-Stokes et du transport sédimentaire, suivant un maillage horizontal rectiligne à mailles inégales. Ce maillage variable permet un raffinement dans certaines zones d'études. Pour plus de détails sur son fonctionnement il est possible de se référer aux articles et thèses suivants : (Cugier and Le Hir, 2000; Cugier and Le Hir, 2002; Le Hir et al., 2001; Le Hir et al., 2009; Struski, 2005; Waeles, 2005).

A partir des nouvelles données acquises aux cours de l'étude sédimentologique et de l'étude hydro-sédimentaire, un nouveau calibrage du modèle est réalisé, par la modification de certains paramètres hydro-sédimentaires.

III-2.3.1. Emprise du modèle dans la baie de Marennes-Oléron

L'implantation du modèle SiAM, à Marennes-Oléron, couvre une très grande surface afin que les flux entrant aux limites du domaine ne perturbent pas les résultats dans la zone étudiée (la baie de Marennes-Oléron). La grille de calcul est bornée à l'Ouest par une limite située à une dizaine de kilomètres à l'Ouest de l'île de Ré (1°46W) et au Sud, par une limite située à une dizaine de kilomètres au Sud du Pertuis de Maumusson. A l'Est, elle inclut les vasières et les fleuves Charente (jusqu'au barrage de St-Savinien) et Seudre (limite de l'influence de la marée). Les mailles de calcul sont rectangulaires et de tailles variables, très grandes aux limites spatiales du modèle (1000 x 1000 m) et plus petites au niveau de la baie de Marennes (200 x 200 m), afin d'obtenir des calculs plus précis dans certaines zones du domaine étudié. Dans notre étude, la grille de calcul contient 24320 mailles (fig. III-15).

La bathymétrie de la baie et des pertuis charentais a été établie à partir de données du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), de données de la DDE 17 (Direction Départementale de l'Environnement) et également de mesures réalisées par l'Ifremer (notamment sur les estrans). Les cotes sont référencées à partir du zéro NGF.

Afin de ne pas pénaliser les temps de calculs par la représentation de la Charente avec des petites mailles, il a été décidé de schématiser l'estuaire. Une bathymétrie « dégradée » a été implantée, reconstituée à partir des quelques relevés bathymétriques disponibles. Ceci permet d'obtenir un profil général du fleuve. La Charente est constituée de mailles variables d'une longueur de 200 m à l'embouchure jusqu'à 3000 m en amont.

La Seudre est représentée par des mailles rectilignes, sans intégration précise de sa bathymétrie, du fait de son rôle secondaire dans les apports sédimentaires. Toutefois, les volumes oscillants en Seudre ont été respectés pour ne pas impacter la circulation des masses d'eau dans le Sud de Marennes-Oléron.

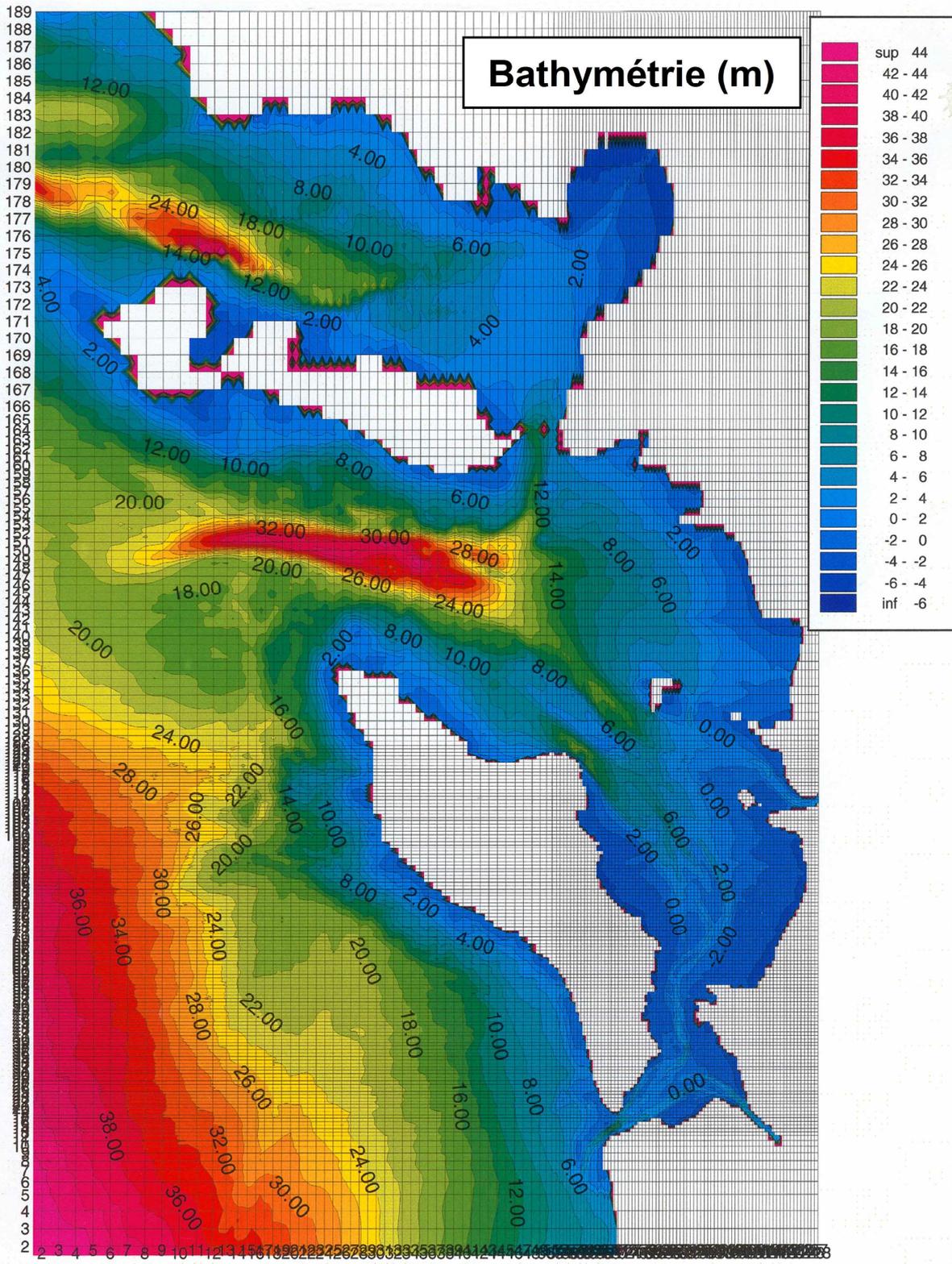


Figure III-15 : Domaine de calcul, maillage et bathymétrie du modèle hydrosédimentaire SiAM-2DH des pertuis charentais

III-2.3.2. Implantation du modèle de transport de sédiment multiclasse

Dans le modèle sédimentaire, les trois types de sédiments considérés dans le modèle (graviers, sables et vases) sont divisés en quatre classes, de masse volumique identique (2600 kg.m^{-3}).

Une distinction est faite au sein des sables (sables moyens et sables fins) et des vases (de façon à marquer les vases initialement en Charente ou apportées par le fleuve), ce qui nous amène à considérer 4 classes de sédiment, au total. Les coupures granulométriques entre ces classes ne sont pas réalisées à partir des classifications granulométriques classiques, mais à partir de leur comportement dans le modèle : vitesse de chute, érodabilité, etc....

- Les graviers : d'un diamètre moyen 2 mm
- Les sables moyens: d'un diamètre moyen de $300 \mu\text{m}$
- Les sables fins : d'un diamètre moyen de $120 \mu\text{m}$
- Les vases : d'un diamètre moyen de $20 \mu\text{m}$

La couverture sédimentaire (fig. III-16) utilisée pour l'initialisation du modèle correspond à celle décrite par Weber (2004), également fournie par le S.H.O.M. Pour chaque faciès sédimentaire observé, une correspondance avec les classes définies dans le modèle a été réalisée (tab. III-8) :

Faciès	Diamètre			
	2 mm	300 μm	120 μm	< 63 μm
Roche				
Cailloutis				
Graviers	100%			
Graviers sableux	50%	50%		
Sable		100%		
Sable fin			100%	
Sable fin envasé			60%	40%
Sable vaseux		60%		40%
Vase				100%

Tableau III-8 : Correspondance entre les faciès sédimentaires définis par Weber (2004) et les classes de sédiments considérées dans le modèle sédimentaire

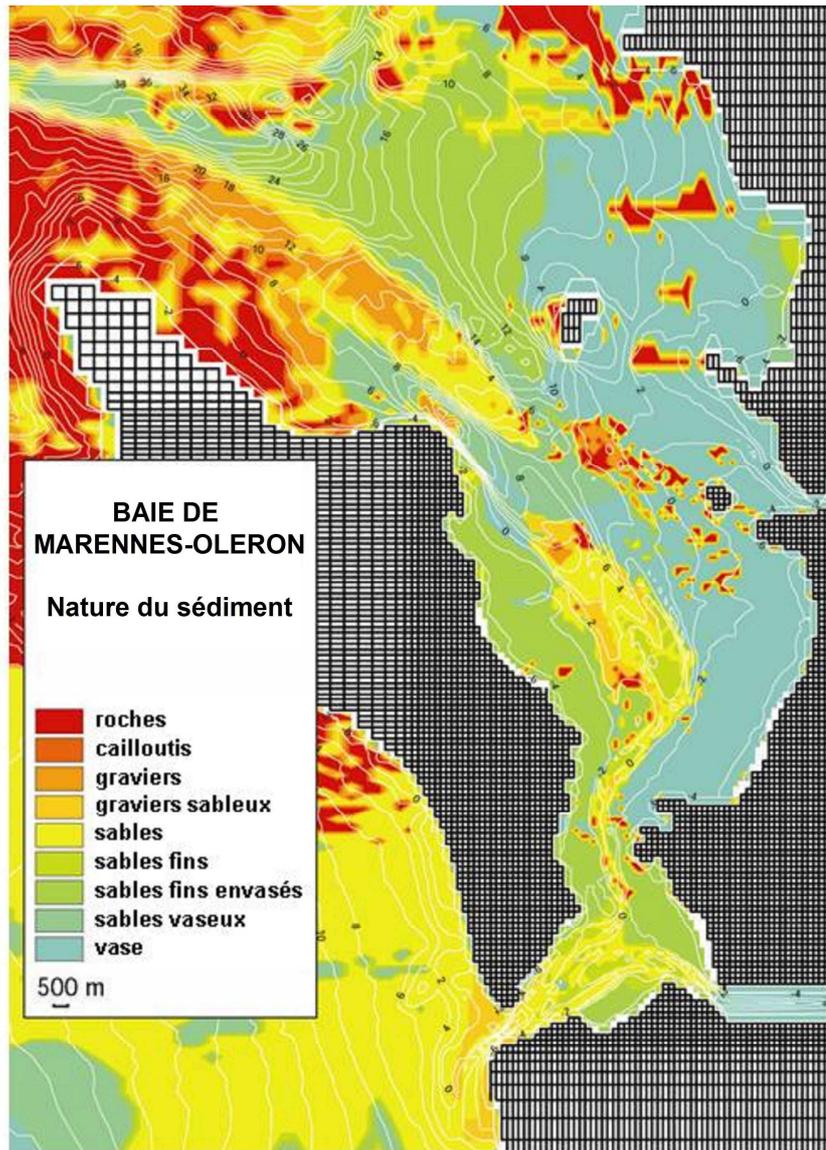


Figure III-16 : Répartition initiale des faciès sédimentaires introduits dans la zone d'étude et "vue" par le modèle hydrosédimentaire SiAM, sur la base de la carte sédimentaire de Weber (2004)

III-2.3.3. Les conditions de la simulation

En vue de réaliser des simulations correspondantes à la période de l'étude hydro-sédimentaire, des changements, dans les paramétrages du modèle, ont été réalisés. Les résultats numériques seront comparés aux mesures *in situ*. Les paramétrages d'un modèle hydro-sédimentaire sont le fruit d'un compromis et ne sont pas définitifs. Il est important de vérifier que les résultats annoncés sont robustes, vis à vis des incertitudes liées au paramétrage (ainsi qu'aux conditions initiales et aux conditions aux limites). Pratiquement, les paramétrages choisis sont généralement susceptibles d'être modifiés en fonction d'informations nouvelles (sur la nature sédimentaire, ou grâce à des mesures supplémentaires).

III-2.3.3.a. Conditions aux limites

Les données de vent (direction et vitesse moyenne) utilisées, sont celles enregistrées au phare de Chassiron (Pointe Ouest de l'île d'Oléron) entre le 1^{er} mars 2007 et le 4 avril 2008 (fig. III-16), ceci afin de forcer les circulations induites par le vent et de simuler les vagues dans l'emprise du modèle.

Au niveau des limites amont, les débits réels 2007-2008 du fleuve Charente ont été introduits, avec une concentration de MES estimée constante de 60 mg/l (pas de mesures disponibles). En revanche, le débit de la Seudre, qui est quasiment nul, a été négligé.

Aux limites marines, une concentration de 5 mg/l en MES (classe « vase ») a été attribuée aux masses d'eau entrant dans le domaine modélisé. Cette valeur plutôt élevée rend compte de manière très schématique de l'influence potentielle de l'estuaire de la Gironde. Une salinité de 34 est imposée dans les flux entrant à ces limites.

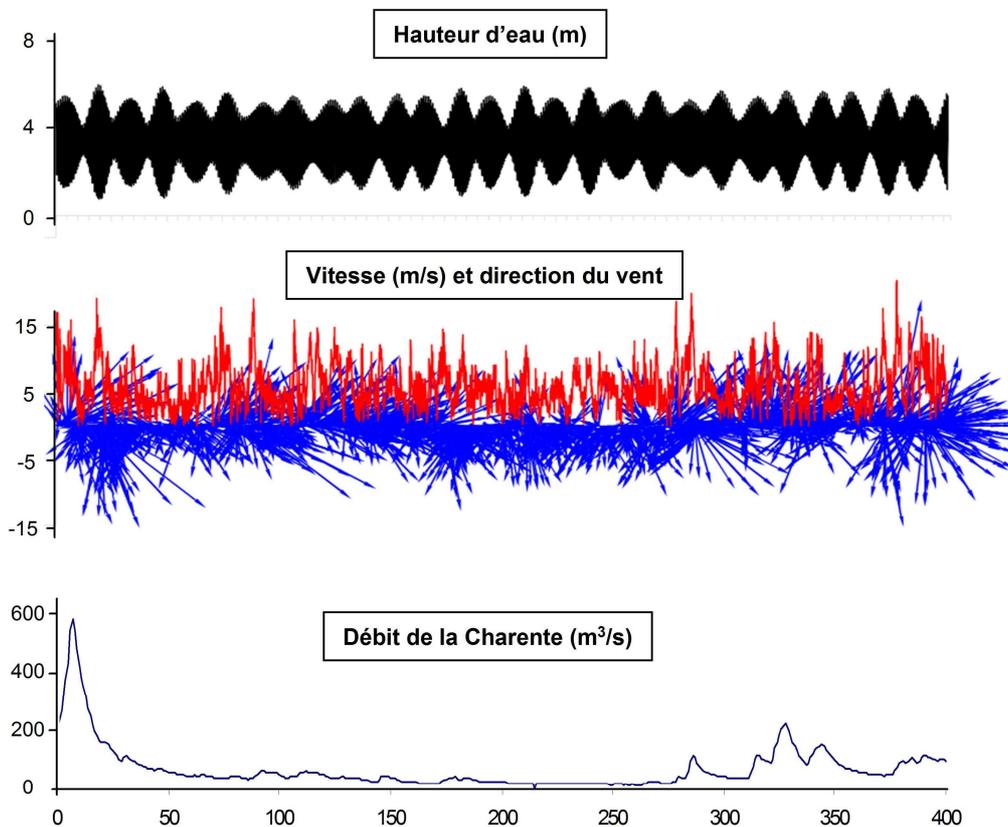


Figure III-17 : Forçages hydrodynamiques réels (01/03/07-04/03/08)

III-2.3.3.b. Calculs des vagues

La propagation des vagues dépend de la hauteur de la surface libre et aussi des courants. Les mailles du modèle étant petites et afin de gagner du temps de calcul, il a été décidé d'utiliser une méthode d'estimation économique, basée sur l'utilisation de résultats

d'un modèle de propagation des vagues (modèle SWAN) établis pour des configurations-types, mais respectant la variabilité naturelle des forçages (par le vent en particulier).

Des détails sont donnés dans le volet « Impact des mers de vent et des courants » de l'étude pour une gestion dynamique des sédiments sur les côtes du bassin de Marennes-Oléron et le pertuis de Maumusson (Le Hir et al., 2006). En résumé, 12 configurations types de vents et de houles ont été identifiées. Ces configurations portent sur les couples intensité/direction de vent les plus "significatives". Puis pour chaque situation, 7 calculs sont réalisés, correspondant à une variation horaire de la hauteur de la surface libre. Cette stratégie permet de prendre en compte, par double interpolation, une situation quelconque des forçages vent/marée.

Plus récemment, l'effet des houles du large a été introduit en exploitant les résultats de propagation des vagues en période de tempête d'ouest : cet aménagement du modèle a été motivé par la comparaison entre les résultats du modèle et les mesures, établie dans le cadre de cette thèse.

Ces houles sont prises en compte dans le modèle de la façon suivante :

On rappelle que par souci d'économie de temps calcul, la simulation des mers de vent et houle du large n'est pas réalisée en instationnaire, « au fil du calcul ». Au contraire, il a été choisi de constituer une base de données de vagues calculées pour différentes configurations de vent (direction/intensité) et différents niveaux de la surface libre. Les hauteurs de vagues retenues pour la simulation sont alors estimées par interpolation entre les configurations les plus voisines dans cette base de données.

Les houles du large ne faisaient pas partie des scénarios. Une première confrontation entre contraintes de vagues sur le fond déduites des mesures et contraintes simulées a conduit à la nécessité d'ajouter dans le modèle un effet des houles du large. Ces dernières font l'objet d'observations à la bouée « Gascogne » de Météo-France.

Il a été supposé que la houle du large (mesurée à la bouée Gascogne) se propage comme la mer de vent calculée pour un vent d'ouest de 17 m/s, au prorata de Hs effectivement observé (ou simulé par ailleurs) à la bouée Gascogne. Le facteur multiplicatif est obtenu comme suit : pour une houle de 9m à la bouée Gascogne, un modèle régional de propagation de vagues simule des vagues de 7.3 m à la limite ouest de notre modèle, alors que la simulation du cas-type « vent d'ouest 17 m/s » conduit à des vagues de 4.5 m dans le même secteur (limite ouest du modèle).

On aura donc, en tout point de la zone d'étude :

$$H_{\text{vag pour houle HGascogne}} = (H_{\text{gascogne}}/9) * 7.3/4.5 * H_{\text{vag pour vent W 17m/s}}$$

Par simplification, les vitesses orbitales liées aux hauteurs de houle ainsi reconstituées sont simplement ajoutées à celles liées aux mers de vent déjà prises en compte.

III-2.3.3.c. Initialisation de la simulation

Avant le démarrage de la simulation, à l'instant t_0 , un stock de crème de vase facilement érodable a été « déposé » sur une zone de l'ordre de 10 km² et sur une épaisseur de 1 m, dans la partie centrale du pertuis d'Antioche (entre les mailles $j=125$ et les mailles $j=160$, pour des cotes du fond inférieures à 10 m sous le zéro des cartes). La concentration de cette vase était de 100 g/l. Une partie de ce stock de vase, une fois remis en suspension, alimente la partie turbide de la colonne d'eau, qui se déplace dans la baie au cours des marées, et qui va se déposer sur les estrans et ainsi participer à la dynamique sédimentaire générale.

Afin d'éviter un piégeage rapide de cette crème de vase dans certaines parties de la baie et afin de favoriser une dispersion rapide de ces sédiments, il a été choisi de ne pas introduire de tassement pendant les 10 premiers jours de la simulation. L'empreinte de ces conditions initiales sur les résultats du modèle est mal connue, c'est pour cela que les résultats ne sont analysés qu'après un premier mois de simulation, et feront l'objet d'une vérification après un an de simulation. Ce temps est jugé suffisant pour que l'introduction arbitraire de la crème de vase ne soit pas ressentie, mais il est vrai que les résultats restent dépendants de l'initialisation, ce qui est généralement le cas des modèles de transport sédimentaire.

III-2.3.3.d. Implantation des zones conchylicoles

Pour prendre en compte l'impact de la culture des huîtres (mais également des moules), sur la sédimentation dans la baie, la longueur de rugosité dans les secteurs conchylicoles a été augmentée. Pour les zones de bouchots (moules sur pieux) et pour les zones de cultures des huîtres sur table, la longueur de rugosité est multipliée d'un facteur 10, en revanche pour les zones de culture des huîtres à plat, z_0 est multipliée par 4 (Robert et al., 2006), par rapport aux zones dépourvues d'installation.

L'implantation des installations conchylicoles est rappelée sur la figure III-18. Cette implantation correspond au cadastre fourni par la DDE17. Les périodes d'installation, et d'enlèvement, des tables ostréicoles, ont été rajoutées, en accord avec les observations réalisées tout au long de l'étude hydro-sédimentaire et en accord avec les dates officielles fournies par les affaires maritimes. Ainsi sur le secteur du banc de Lamouroux, du banc d'Agnas et entre le Château d'Oléron et le Sud de la pointe de Bellevue, les tables ostréicoles sont présentes entre le 1^{er} juin 2007 et le 30 novembre 2007. Le reste de l'année, la rugosité est considérée équivalente à celles des zones dépourvues d'ostréiculture.

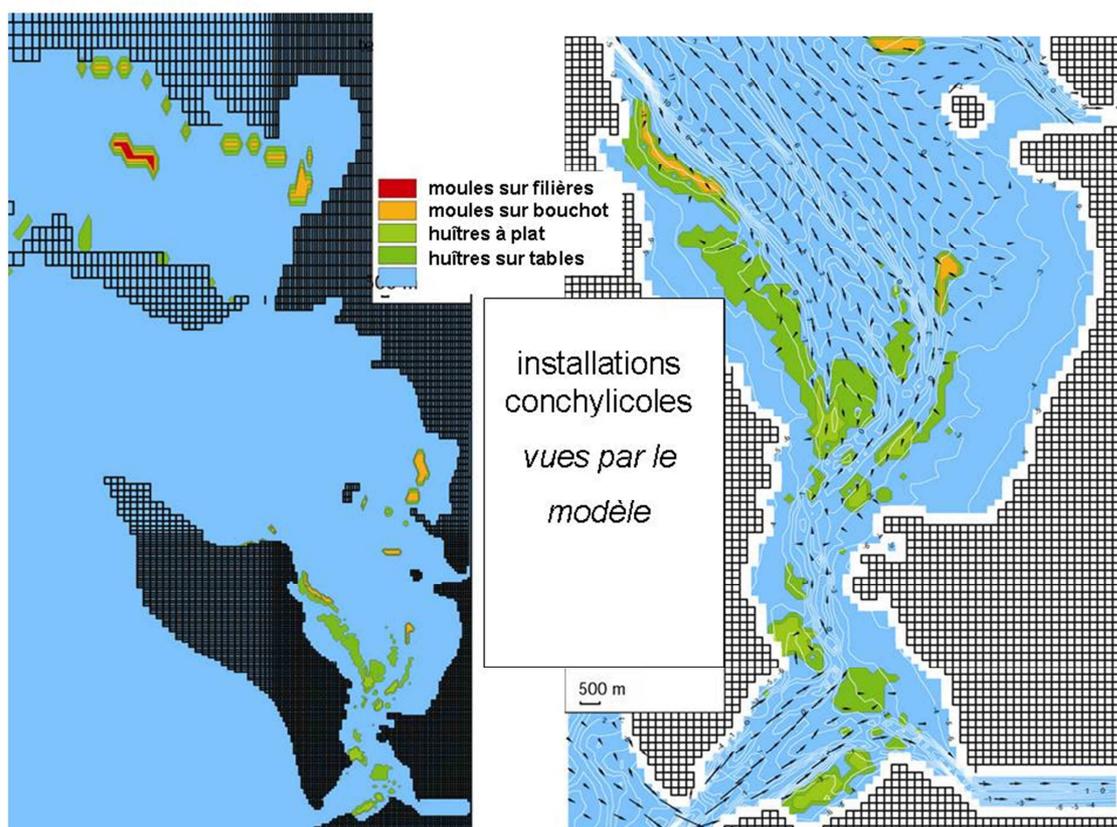


Figure III-18 : Implantation des différents types d'élevages conchylicoles, vue par le modèle hydrosédimentaire SiAM-2DH de la baie de Marennes-Oléron. A gauche, ensemble du secteur modélisé; à droite, zoom sur le bassin de Marennes-Oléron

III-2.3.4. Couplage des modules courantologique, de vague et de transport des sédiments (sable et vase)

Le fonctionnement du code de calcul hydro-sédimentaire SiAM-2DH appliqué à la baie de Marennes-Oléron est schématisé dans la figure III-19. Ce schéma montre les interactions entre les différents modules du modèle SiAM-2DH ainsi que les paramètres hydro-sédimentaires pris en compte dans les calculs.

La contrainte de cisaillement sur le fond (τ_c) calculée par le modèle courantologique est combinée à la contrainte de cisaillement sur le fond (τ_w) due aux vagues qui est une fonction de la vitesse orbitale (U_{br}), pour donner une contrainte totale sur le fond (τ_b). Les flux de dépôt et d'érosion de sable et de vase sont calculés en fonction de la contrainte totale sur le fond (τ_b) et de la contrainte critique de mise en mouvement du sédiment superficiel (τ_{ce}). Cette contrainte (τ_{ce}) dépend des fractions respectives de sable et de vase dans la couche superficielle ainsi que des variations de la consistance de la vase calculées par un modèle empirique de consolidation, la colonne de sédiment étant discrétisée en couches fines (de l'ordre du mm). Les flux de dépôt et d'érosion constituent les termes source et puit d'une équation d'advection-dispersion qui simule le transport en suspension des sédiments sableux et vaseux.

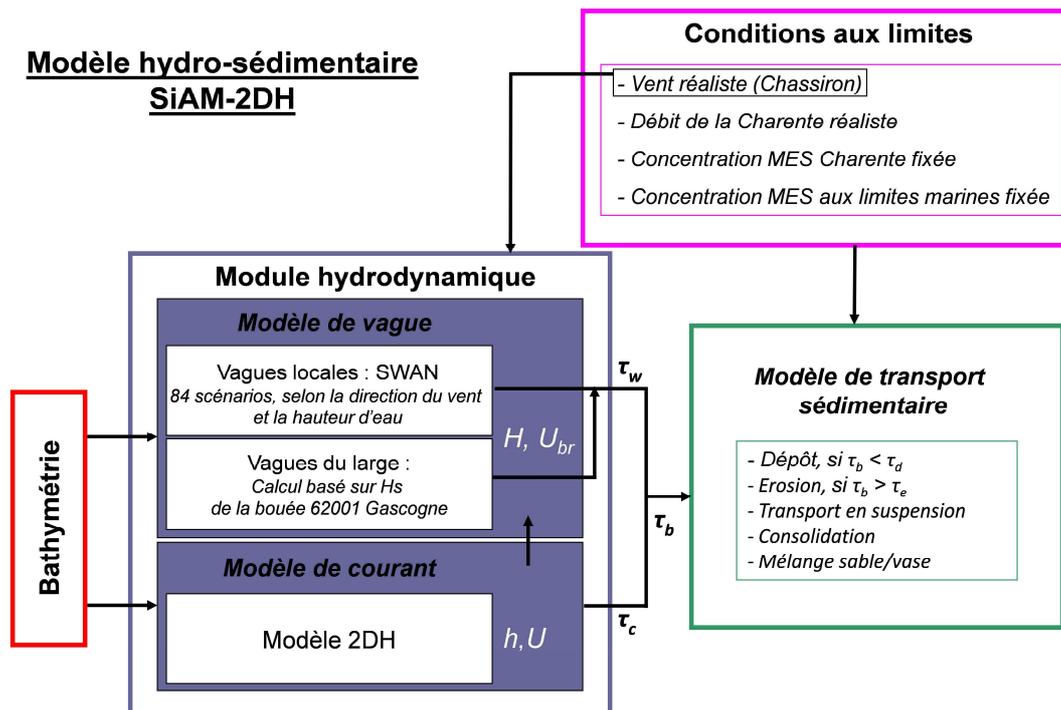


Figure III-19 : Principe général du modèle hydro-sédimentaire SiAM-2DH, appliqué à la baie de Marennes-Oléron

III-3. Conclusions

Le couplage d'une étude sédimentologique, d'une étude hydro-sédimentaire et de l'utilisation de la modélisation appliquée permet d'avoir une vision intégrée en termes de dynamique sédimentaire de la baie, du sédiment aux estrans.

Ainsi, l'approche « matériaux », avec le couplage entre la sédimentologie et la rhéologie permet de mettre en évidence, en laboratoire, les relations entre les caractéristiques mécaniques (notamment par la détermination du seuil d'écoulement) et les caractéristiques texturales des sédiments.

L'étude de la réponse de l'interface aux forçages et l'étude de l'influence des différents forçages sur la stabilité des estrans, à court et moyen terme, est possible grâce à la mise en place d'une étude hydro-sédimentaire basée sur une acquisition synchrone des caractéristiques des vagues et de la hauteur du sédiment en plusieurs sites intertidaux de la baie de Marennes-Oléron, ceci afin d'observer l'évolution simultanée de plusieurs sites soumis à des événements identiques.

Enfin, la compréhension des mécanismes hydro-sédimentaires à l'échelle de la baie de Marennes-Oléron est possible grâce à l'utilisation du modèle numérique hydro-sédimentaire SiAM-2DH appliqué à la baie, sur la base d'un nouveau calibrage.

Partie IV : Physique et mécanique des sédiments superficiels de la baie de Marennes-Oléron

IV-1. Introduction

Dans cette partie sont présentés les résultats des analyses granulométriques et des mesures rhéologiques obtenus sur un grand nombre de sédiments prélevés, au cours de deux saisons (été 2006 et hiver 2007), sur les zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron. Les prélèvements de l'interface (0-2 cm) ont été effectués à marée basse sur trois niveaux.

La confrontation des caractéristiques physiques et mécaniques permet d'élaborer une classification des faciès sédimentaires et d'établir les relations entre les paramètres, texture, concentration et seuil d'écoulement.

A partir de la localisation des différents types sédimentaires et des observations de terrains lors des échantillonnages, des cartes saisonnières de répartition des sédiments superficiels sont proposées.

IV-2. Présentation des résultats de la caractérisation physique et mécanique des matériaux

IV-2.1. Taille des particules

L'étude micro-granulométrique de 330 échantillons prélevés entre 2005 et 2008, permet d'avoir une bonne représentativité spatio-temporelle de la texture des sédiments superficiels.

Pour l'ensemble de la population étudiée, les tailles médianes des échantillons vont de $7 \mu\text{m}$ à $313 \mu\text{m}$. La taille médiane de tous les échantillons est de $104 \mu\text{m}$, correspondant à des sables fins (tab. IV-1). Ces échantillons se répartissent selon deux groupes bien distinct : 36 % sont associés à des silts fins et 37% à des sables fins (fig. IV-1).

Médiane (μm)	Plage (μm)	Minimum (μm)	Maximum (μm)
104	306	7	313

Tableau IV-1 : Données statistiques des sédiments mixtes (sables/vases) prélevés au niveau de l'interface sédimentaire, entre 2005 et 2008

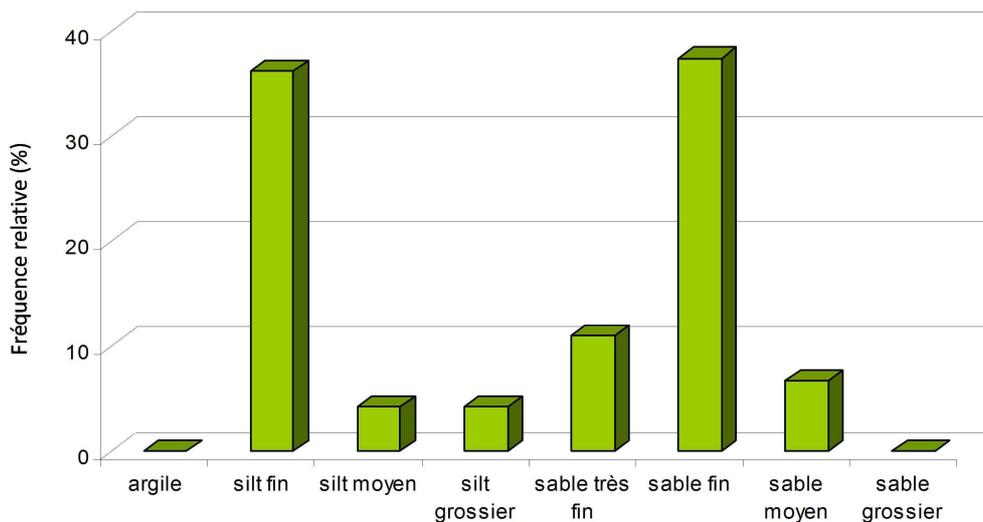


Figure IV-1 : Histogramme des fréquences relatives des différents sédiments mixtes (sables/vases) prélevés (basé sur la médiane granulométrique, norme USDA)

L'observation des fréquences relatives des tailles des particules (fig IV-2) montre que les sédiments vaseux, prélevés sur la vasière de Brouage ou sur le banc de Lamouroux (été), ont un mode centré sur les silts fins, tandis que ceux prélevés sur l'estran occidental présentent un mode centré sur les sables fins.

Il y a donc une vraie différence dans les faciès sédimentaires étudiés entre les deux estrans, avec une zone centrale influencée suivant les saisons et les pratiques ostréicoles

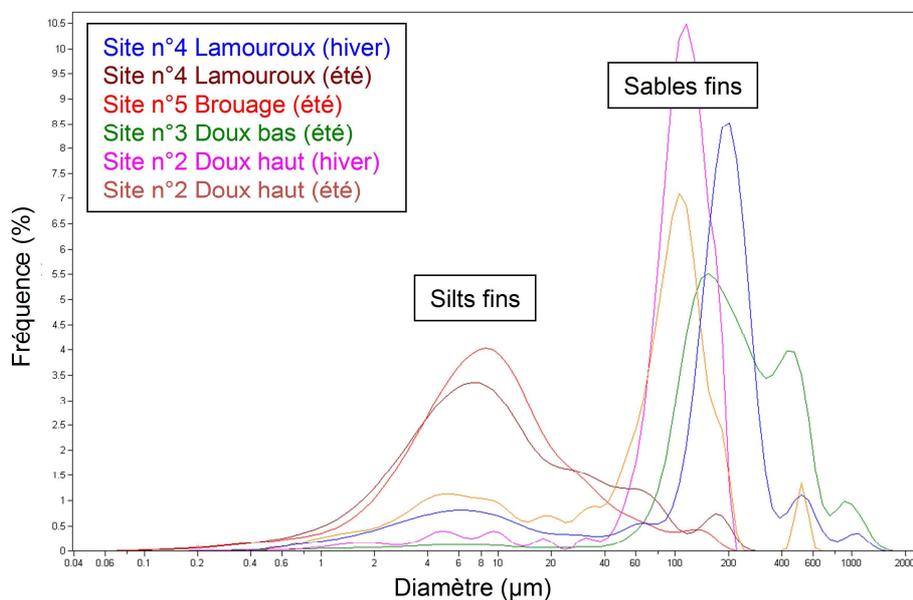


Figure IV-2 : Fréquences relatives de taille de particules pour différents sites de la baie de Marennes-Oléron

Dans le triangulaire de Flemming (Flemming, 2000), il apparaît très clairement que la totalité des sédiments prélevés dans la baie s'aligne sur une seule et même droite (fig. IV-3).

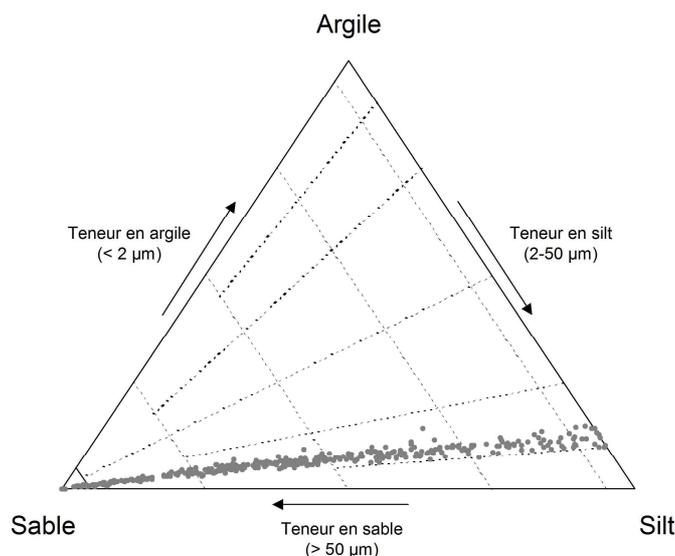


Figure IV-3 : Diagramme triangulaire sable-silt-argile (Flemming, 2000) des sédiments mixtes (sables/vases) de la baie de Marennes-Oléron

Cet alignement correspond à un rapport constant entre la fraction argileuse et la fraction silteuse. Ce rapport de 0,17 est inférieur à celui de 0,25, obtenu par Van Ledden (2003) dans les Western Scheldt aux Pays-Bas. La nature texturale des sédiments de la baie peut alors être définie uniquement à partir de la teneur en sable.

L'interprétation de Van Ledden indique que les particules argileuses et silteuses sont transportées ensemble dans la colonne d'eau. Il est très probable que les particules silteuses soient piégées dans les sédiments cohésifs flocculés, ces floccs étant transportés par l'intermédiaire des courants tidaux. L'existence de ce rapport implique qu'il est possible de connaître la composition sédimentaire d'un échantillon prélevé dans la baie à partir de sa teneur en sable. Dans notre cas, la valeur de ce rapport est caractéristique de la baie, ce qui permet de la différencier des autres environnements.

Les sédiments naturels ont un comportement érosif différent en fonction de leur teneur en sable, en silt, en argile et en eau. Ce comportement dépend de la cohésion du sédiment mais aussi de la structure de son réseau.

La structure du réseau d'un mélange de sédiments est déterminée par les proportions relatives de sable, de silt et d'argile. A partir d'expériences de fluidification, Merckelbach (2000) a montré que les particules de sables forment un réseau lorsque leur fraction volumique (ϕ_{sa}) dépasse 40-50 %. De même, les particules de silt forment un réseau si leur fraction volumique (ϕ_{si}), par rapport au volume poreux autour des particules de sables ($\phi_{si}/(1-\phi_{sa})$) est supérieur à 40-50 %. Dans d'autres cas, la fraction argileuse forme un réseau, si les particules argileuses sont suffisamment présentes dans le mélange.

En se basant sur les travaux de Van Ledden *et al.* (2004), les limites de transition entre un réseau dominé par les sables ou par les silts (tab. IV-2) peuvent être représentées dans un diagramme triangulaire (fig. IV-4). La ligne horizontale noire indique la transition entre un sédiment cohésif et un sédiment non-cohésif, pour une valeur moyenne de 7,5 %. Les lignes en pointillées dans le coin gauche de la figure IV-4 indiquent la limite d'une structure de

réseau dominée par les sables pour différentes fractions volumiques d'eau (ϕ_w). Cette limite est déterminée par la fraction volumique de sable : $\phi_{sa}=(1-\phi_w)\rho_{sa}$. Par conséquent, la position de cette transition dans le diagramme triangulaire ne dépend pas seulement de la fraction volumique de sable, mais également de la fraction volumique d'eau. La fraction volumique minimale de sable nécessaire pour former une structure de réseau dominée par les sables est de 40 %. Si la densité des particules solide est égale à 2650 kg/m³, alors la fraction volumique d'eau pour des valeurs de 40 %, 45 % et 50 % correspond à des concentrations de 1590, 1458 et 1325 kg/m³.

Respectivement, les lignes en pointillées dans le coin droit du diagramme représentent la limite d'une structure de réseau dominée par les silts pour différentes fractions volumiques d'eau. Cette limite est déterminée par la fraction volumique de silt par rapport au volume des pores entre les particules de sables :

$$\frac{\phi_{si}}{1-\phi_{sa}} = \frac{(1-\phi_w)\rho_{si}}{1-(1-\phi_w)\rho_{sa}}$$

Par conséquent, la position de cette transition dans le diagramme dépend également de la fraction volumique d'eau contenue dans le sédiment. Les paramètres de ces transitions sont analogues à ceux déterminés pour les sables, avec $\phi_{si}(1-\phi_s) = 40\%$ et $\phi_w = 40\%$, 45 % et 50 % respectivement.

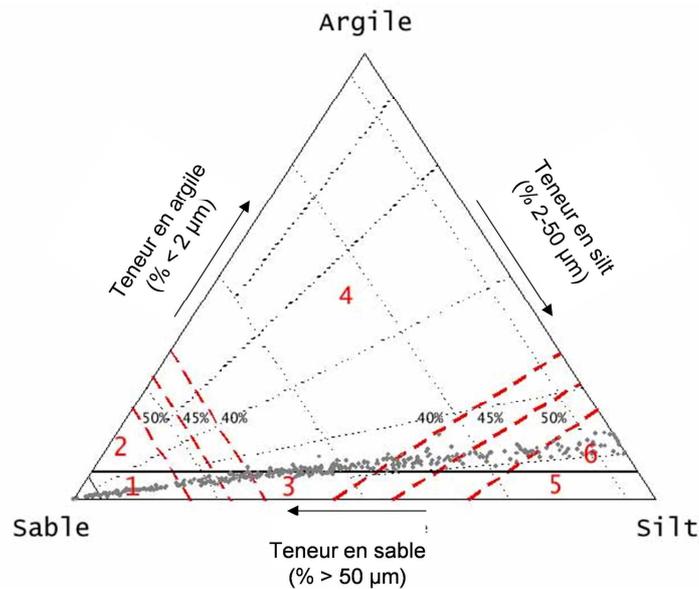


Figure IV-4 : Diagramme triangulaire sable/silt/argile avec la transition entre les sédiments cohésifs/non cohésifs et les différents réseaux possible. (1 = non cohésif dominé par les sables, 2 = cohésif dominé par les sables, 3 = non cohésif mixte, 4 = cohésif dominé par les argiles, 5 = non cohésif dominé par les silts et 6 = cohésif dominé par les silts)

Domaine	Cohésion	Réseau
1	Non	Sable
2	Oui	Sable
3	Non	Mixte
4	Oui	Argile
5	Non	Silt
6	Oui	Silt

Tableau IV-2 : Les différents réseaux et leurs cohésions associés (d'après Van Ledden et al., 2004)

Les sédiments de la baie ne présentent pas de réseaux cohésifs dominés par les sables (domaine 2), et non-cohésifs dominées par les silts (domaine 5). En revanche, les réseaux non-cohésifs dominés par les sables (domaine 1), cohésifs dominés par les silts (domaine 6) et dans une moindre mesure par les argiles (domaine 4) sont les plus nombreux (tab. IV-2).

IV-2.2. Teneur en eau des sédiments

La teneur en eau des sédiments varie entre 31 et 249%, pour une moyenne autour de 77% (Fig. IV-5 et tab. IV-3). Moins de 10 % des échantillons ont une teneur en eau inférieure à 50 %, et correspondent essentiellement à des sédiments consolidés ou en cours de consolidation. En revanche les sédiments présentant une teneur en eau très forte ($W\% > 120\%$) représentent seulement 23% des échantillons étudiés.

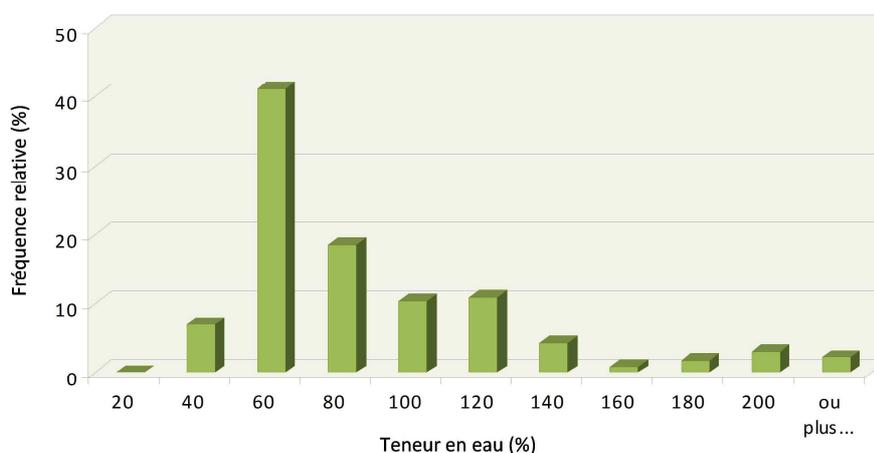


Figure IV-5 : Histogramme des fréquences relatives des teneurs en eau des sédiments mixtes (sables/vases) prélevés à l'interface

Moyenne	Médiane	Minimum	maximum
77%	61%	31%	249%

Tableau IV-3 : Valeur moyenne, médiane, minimale et maximale des teneurs en eau de l'ensemble des sédiments prélevés à l'interface, entre 2005 et 2008

Les matériaux prélevés sont supposés être saturés, ainsi à partir des relations classiques il est possible d'en déduire la teneur en eau pondérale, la fraction volumique solide et la concentration (tab.IV-4)

Teneur en eau (W en %)	Fraction volumique solide (Φ)	Concentration (c en g/l)
0	1,00	2650
40	0,49	1286
80	0,32	849
120	0,24	634
160	0,19	506
200	0,16	421
240	0,14	360

Tableau IV-4 : Valeurs équivalentes entre les différents paramètres physiques

IV-2.3. Seuil d'écoulement des sédiments

Les matériaux étudiés ici présentent des concentrations comprises entre 290 et 1400 g/l. Ils correspondent à des suspensions de grains fins à mixtes à différents états de concentration.

Les rhéogrammes obtenus indiquent que les sédiments de la baie de Marennes-Oléron présentent un comportement de fluide à seuil rhéofluidifiant, avec la viscosité diminuant avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement (fig. IV-6).

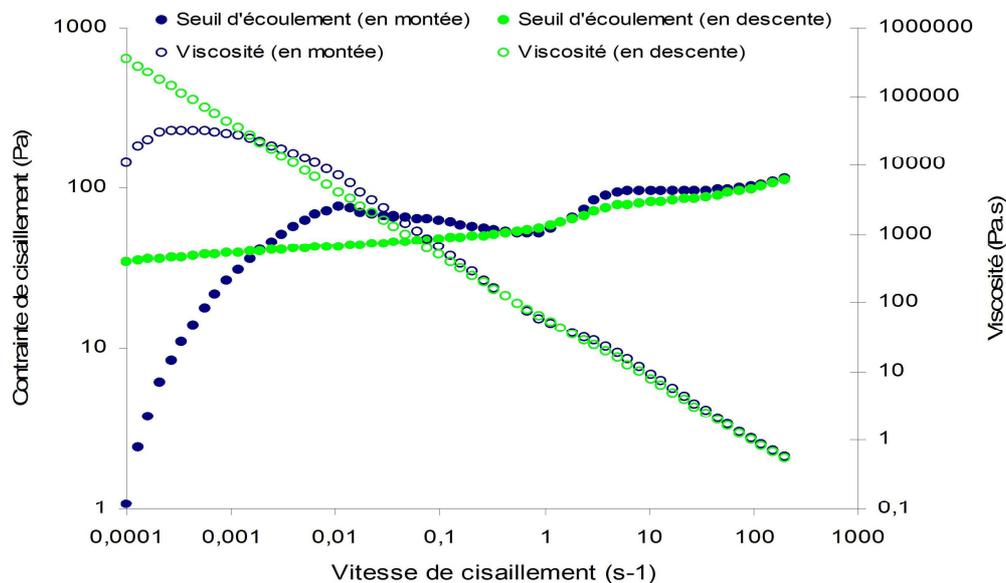


Figure IV-6 : Exemple de rhéogramme type des sédiments superficiels de la baie de Marennes-Oléron (cas d'un sédiment d'une concentration de 777 g/l, contenant 6 % d'argile, 37 % de silt et 57 % de sable)

Le seuil d'écoulement est défini à partir d'un essai d'écoulement pseudo-établi à la descente, en considérant la valeur de la contrainte de cisaillement à $0,1 \text{ s}^{-1}$. Pour certains échantillons, le seuil d'écoulement n'a pas été mesuré du fait d'une trop forte teneur en sable. Les valeurs de τ_y sont comprises entre 10 Pa et 320 Pa. Les valeurs de seuil d'écoulement sont nettement plus fortes (8-325 N/m^2) que les rigidités initiales identifiées par Migniot en 1968 (0.01-100 N/m^2) avec le viscosimètre Brookfield. Les types de sédiments étudiés ici sont beaucoup plus hétérogènes que ceux étudiés par Migniot.

La figure (fig. IV-7) indique une série de rhéogrammes mesurés sur un même site qui s'organisent en fonction de la teneur en eau.

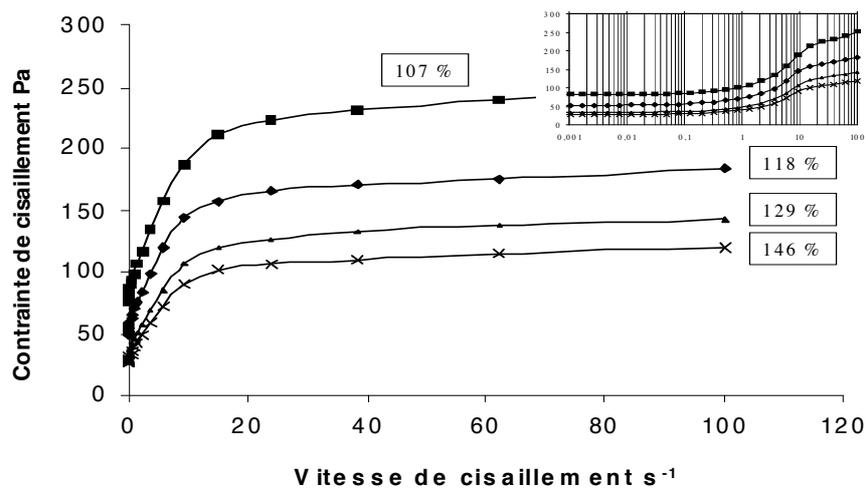


Figure IV-7 : Rhéogrammes caractéristiques des vases de Monportail (représentation des échelles linéaire et logarithmique) à différentes teneurs en eau (Kervella et al., 2009a)

Pour caractériser le comportement des matériaux en grandes déformations, certains rhéogrammes ont été ajustés par le modèle d'Herschel-Bulkley (fig. IV-8). L'application de ce modèle est satisfaisante sur la partie de la courbe descendante inférieure à 10 s^{-1} (fig IV-8a), au delà de 10 à 20 s^{-1} , la courbe tend progressivement vers une asymptote (fig IV-7), rendant l'application du modèle d'Herschel-Bulkley plus délicate (fig. IV-8b).

Il est possible que, lorsque les vitesses de cisaillements sont supérieures à 10 s^{-1} , une stratification de l'écoulement puisse avoir lieu liée à la présence de particules de diamètres différents dans la solution.

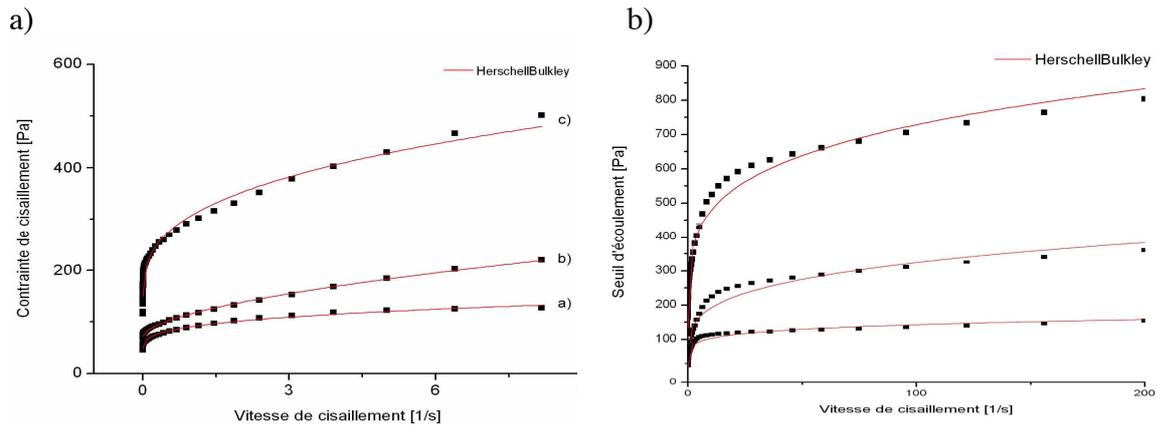


Figure IV-8 : Exemple d'application du modèle de Herschel-Bulkley sur des rhéogrammes, en phase descendante, de différents sédiments mixtes (sables/vases) de la baie

Le tableau IV-5 présente des valeurs du seuil d'écoulement (τ_y), de la consistance de la structure (k) et de l'indice de fluidification (n) pour les trois exemples figurant dans la figure IV-7.

Référence	Caractéristiques sédimentaire					Paramètres de Herschel-Bulkley		
	Concentration (g/l)	Teneur en eau (%)	Sable (%)	Silt (%)	Argile (%)	τ_0 (Pa)	k	n
a)	420	201	17	72	11	45	45	0,31
b)	530	153	8	81	11	72	44	0,57
c)	720	102	10	79	11	144	166	0,34

Tableau IV-5 : Exemples de caractéristiques sédimentaires de différents échantillons et valeurs des paramètres de l'équation d'Herschel-Bulkley, pour des vitesses de cisaillements inférieures à 10 s^{-1}

IV-3. Interrelation entre les paramètres rhéophysiques

L'interrelation entre la teneur en sable, le seuil d'écoulement et la teneur en eau du sédiment est représentée dans la figure IV-9 pour l'ensemble de la population étudiée. Il apparaît une certaine relation entre (1) la teneur en eau et la teneur en sable et (2) la teneur en eau et le seuil d'écoulement. La relation entre la teneur en sable et le seuil d'écoulement est a priori aléatoire.

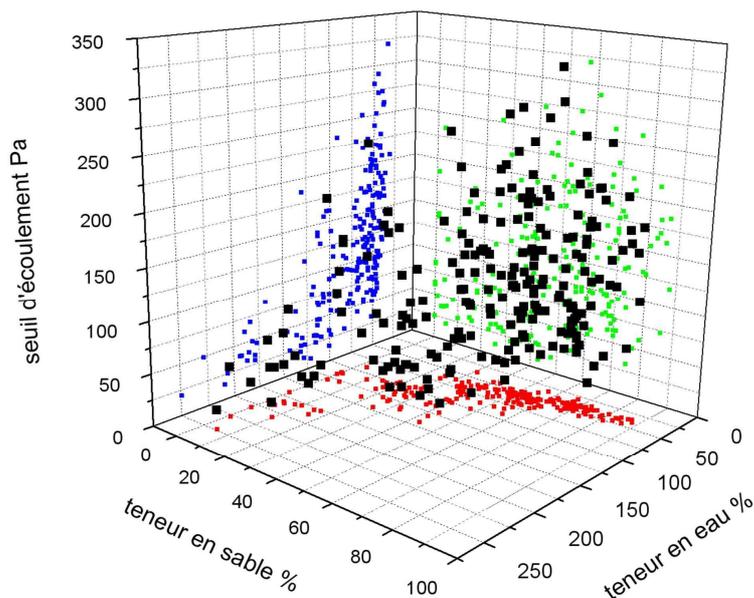


Figure IV-9 : Relation entre le seuil d'écoulement, la teneur en sable et la teneur en eau des sédiments mixtes (sables/vases)

⇒ La teneur en eau est corrélable à la teneur sable (fig. IV-10). Pour une teneur en sable entre 65 % et 100 %, la teneur en eau varie peu, elle est de l'ordre de 40 %. Lorsque la fraction sableuse est plus faible, la variation de la teneur en eau est nettement plus importante. Cette observation est classique en mécanique des sols, en effet la capacité de rétention de l'eau (eau libre et eau liée) dans l'espace poral est nettement plus importante pour les matériaux fins que les matériaux grossiers.

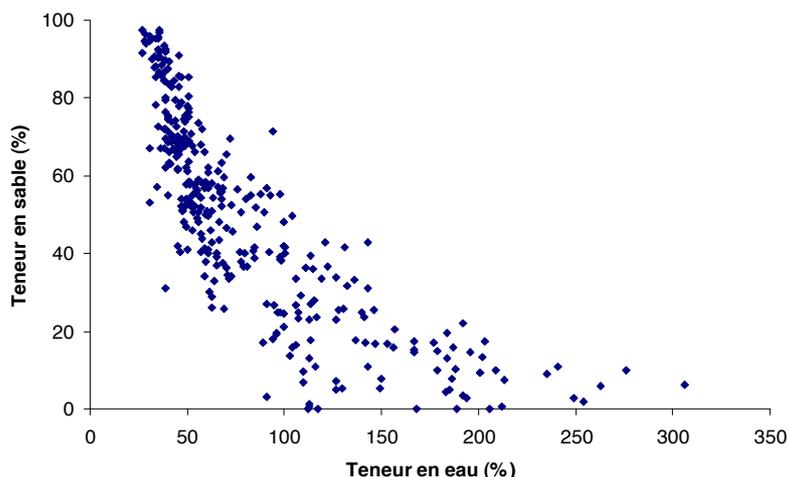


Figure IV-10 : Relation entre la teneur en sable et la teneur en eau des sédiments mixtes (sables/vases)

⇒ Il a été montré dans la partie IV-2.1., que la nature texturale des sédiments de la baie est strictement dépendante de leur teneur en sable. La constitution de cinq catégories de sédiments en fonction de différentes teneurs en sable (75 - 60, 60 - 45, 45 - 29, 29 - 18

et < 18 % de sable) à permis l'identification de relations entre les seuils d'écoulements mesurés et les teneurs en eau associées. Ces cinq types rhéologiques de sédiments sont désignés ci-après par des chiffres romains (tab. IV-6). Ces sédiments ont un comportement mécanique dépendant de la teneur en eau (fig. IV-11).

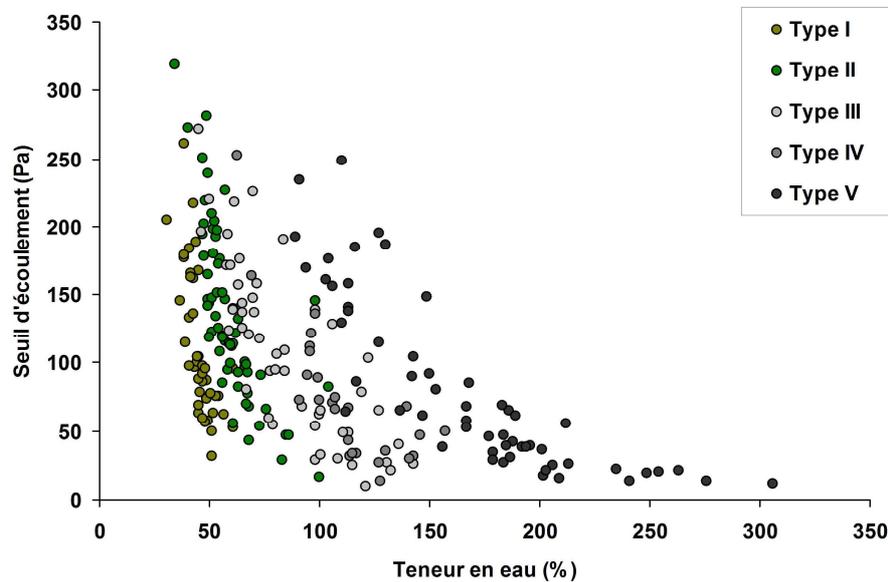


Figure IV-11 : Relation entre le seuil d'écoulement et la teneur en eau, en fonction des types de sédiments mixtes (sables/vases) définis à l'aide de la rhéométrie

Faciès	Type rhéologique	Fraction (%)		
		Sable	Silt	Argile
Sables	-	100-90	0-8	0-2
Sables peu vaseux	-	90-75	8-21	2-4
Sables vaseux	I	75-60	21-34	4-6
Sables très vaseux	II	60-45	34-46	6-9
Vases sableuses	III	45-29	46-61	9-10
Vases peu sableuses	IV	29-18	61-71	10-11
vases	V	18-0	71-87	11-13

Tableau IV-6 : Description des limites des différentes fractions sédimentaires en fonction des types sédimentaires définis à l'aide de la rhéométrie

Les sédiments grossiers ont des teneurs en eau naturellement plus faibles et du même ordre de grandeur que celle d'un sol sableux saturé, de l'ordre de 50%, où les particules entrent en contact direct au cours du cisaillement. Ces sédiments constituent des suspensions granulaires (eau-fines-grains), c'est à dire qu'il s'agit du mélange d'un fluide et de grains non colloïdaux en concentration suffisamment grande pour qu'il existe un réseau de contacts intergranulaires traversant de part en part le mélange (Coussot et Ancey, 1999). Ce type de suspensions présente des propriétés physiques (Ancey, 1997), comme la dilatance, le caractère biphasique de la suspension ou encore le phénomène de ségrégation des particules

dans le milieu. En fonction de la concentration en élément solide, l'écoulement peut adopter un régime frictionnel, lubrifié ou collisionnel. Les distributions des forces peuvent alors être totalement différentes pour une même configuration des particules. La mesure dans ces conditions est délicate du fait des effets perturbateurs de la présence d'un grain grossier par rapport à la taille de l'entrefer. Ceci explique la variabilité des valeurs de seuil mesurées.

Dans le cas des vases et des biodépôts regroupés dans le type V, les valeurs de seuil d'écoulement de ces sédiments sont dépendantes significativement de la teneur en eau. Leur résistance mécanique au cisaillement est due essentiellement aux effets visqueux. Ceux-ci traduisent des interactions d'origine physico-chimiques entre particules et partiellement l'action du frottement direct des particules grossières. Ces interactions induisent une agglomération des particules pouvant emprisonner une fraction de la phase liquide. Ces agglomérations sont désignées comme étant des Unités Structurelles (US) par Quémada (1997). Dans le type V, il n'y a pas de différence de comportement entre les vases et les biodépôts, malgré la présence de matières organiques. Ce point mériterait d'être approfondi.

Les cas intermédiaires (type II, III et IV), constituant des suspensions granulaires, montrent l'influence de la diminution progressive de la teneur en sable dans le mélange, comme l'avait déjà montré d'autres auteurs (Mitchener et Torfs, 1996; Torfs et al., 1996; Van Ledden et al., 2004). Ces suspensions correspondent à des mélanges ternaires « eau-fines-grains ».

NB : Dans la suite de l'analyse, cette relation sera traduite en fraction volumique solide (fig. IV-12).

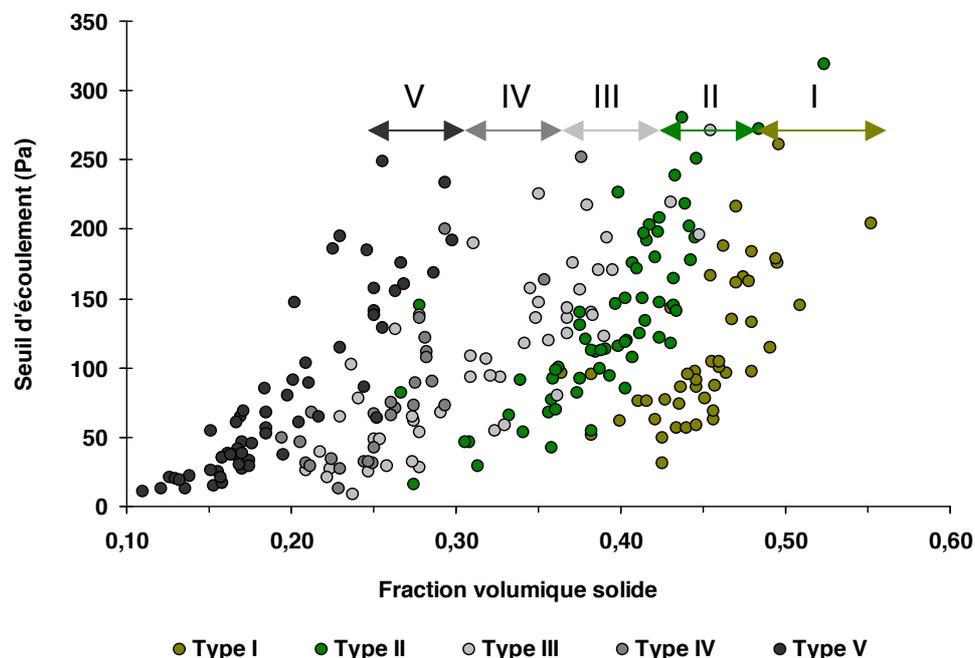


Figure IV-12 : Relation entre le seuil d'écoulement et la fraction volumique des différents types de sédiments définis à partir des analyses rhéologiques et granulométriques

Pour chacun des types de sédiments identifiés, la relation qui relie la fraction volumique solide au seuil d'écoulement (fig. IV-12) suit une relation puissance avec des coefficients de régression R^2 satisfaisant, à l'exception du type I (tab. IV-7). Cette figure illustre très bien la notion d'enrobage d'inclusions défini par Charonnat (1993) et mis en avant par Toutou et al. (2004) dans le cas de micro-bétons. Ainsi notre sédiment peut être apparenté à un béton composé de suspensions d'unités structurales (grains porteur avec leur cortège), ici des grains de sable associés aux particules fines, dans un fluide saturant dont la formulation est voisine de celle du cortège. L'augmentation progressive des grains de sable dans le mélange va modifier les unités structurelles et lors d'un écoulement la structure interne de la suspension se réarrange, conduisant à une modification de la valeur du seuil d'écoulement.

Le coefficient de régression linéaire du type I (sable vaseux) est relativement faible ($R^2 = 0,41$), ceci du fait de nombreux problèmes expérimentaux liés à la présence des grains de sables. Cette faible valeur peut également être attribuée au fait qu'il n'a pas été possible de mesurer le seuil d'écoulement d'échantillons de ce type présentant une fraction volumique solide faible ($< 0,40$). Dans ces conditions, l'établissement de la courbe maîtresse pour ces sédiments est plus difficile à établir. Il convient de remarquer que ce type de sédiment peut contenir, dans certains cas, suffisamment de fines pour que le seuil d'écoulement soit dominé par celles-ci. Ces sédiments semblent être en excédant de pâte qui enrobe les grains, ces derniers apparaissant comme des inclusions dans le mélange. Ils peuvent donc présenter une certaine cohésion. Néanmoins, en absence de nouvelles données, ils peuvent être considérés comme des matériaux granulaires. Et la limite entre sédiments cohésifs et non-cohésifs est alors marquée pour une teneur en sable de 60%.

Type	Faciès	Equation	R^2
I	Sables vaseux	$y = 2042x^{3,8}$	0,41
II	Sables très vaseux	$y = 2932x^{3,4}$	0,61
III	Vases sableuses	$y = 2578x^{2,9}$	0,65
IV	Vases peu sableuses	$y = 6580x^{3,4}$	0,60
V	vases	$y = 11482x^{3,2}$	0,84

Tableau IV-7 : Relation entre le seuil d'écoulement et la fraction volumique solide pour les cinq types de sédiments

⇒ L'ensemble des données est ici reporté dans le diagramme sédimentaire (fig. IV-13) proposé par Van Ledden. Il y apparaît une double organisation, l'une en fonction des types de matériaux et l'autre en fonction de la masse volumique sèche, où la ligne $\tau_y = 100$ Pa permet de mieux dissocier les données, en distinguant pour un type X, des valeurs X_{inf} et X_{sup} caractéristiques respectivement d'un état lâche et d'un état dense.

Les sédiments de la baie s'inscrivent dans la plage de données des sédiments du Western Scheldt (Hollande) étudiés par Allersma (1988) pour des dépôts frais ($\alpha_c=0$) et pour des dépôts consolidés ($\alpha_c=2,4$). A partir de la relation $\rho_{sec}=480\alpha_c+(1300-280\alpha_c)\rho_{sa}^{0,8}$, proposée par Allersma (1988), le coefficient α_c des sédiments prélevés la baie est proche de 0,8, caractéristique de dépôts frais ou en cours de consolidation.

Une grande partie des sédiments superficiels de la baie correspond à des dépôts frais ou en cours de consolidation.

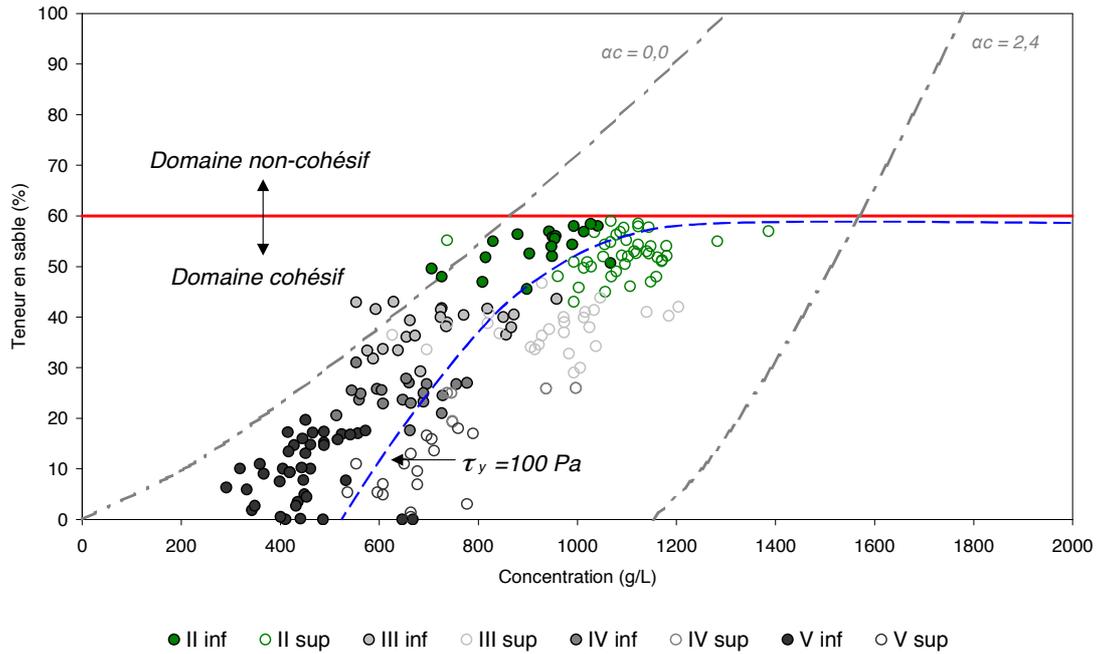


Figure IV-13 : Diagramme sédimentaire de phase des sédiments de la baie de Marennes-Oléron

⇒ A partir des données granulométriques et des fractions volumiques solides totales, il est possible de définir la fraction volumique solide des sables, des silts et des argiles. La figure IV-14, montre les relations entre la fraction volumique solide de vases avec le seuil d'écoulement (les vases ou les fines regroupent la classe des silts et des argiles).

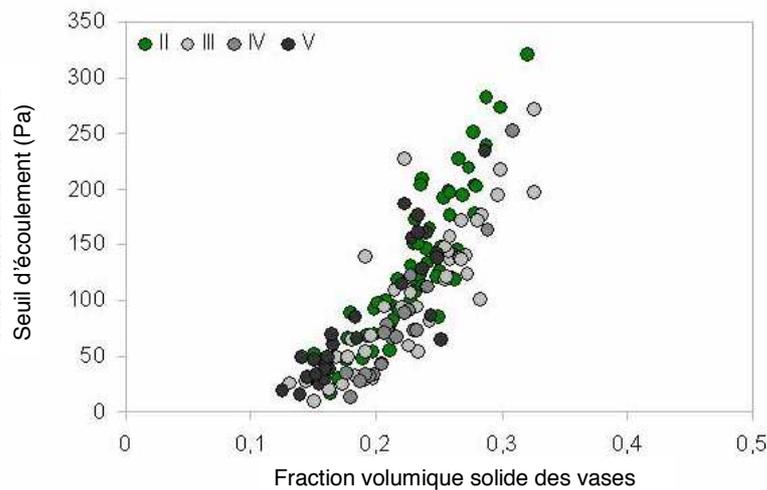


Figure IV-14 : Relation entre la fraction volumique des vases (argile+silt) et le seuil d'écoulement mesuré sur les sédiments superficiels des zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron

Il apparaît donc pour l'ensemble des sédiments superficiels de la baie qu'il existe une relation polynomiale unique entre le seuil d'écoulement et la fraction volumique solide des vases (ϕ_f) du type : $\tau_{y0} = A \cdot \phi_f^n$, avec $A = 8528$ et $n = 3$.

Cette relation peut être exprimée en fonction de la concentration en solide (C en g/l) et s'écrire $\tau_{y0} = B \cdot C^n$. Pour cela, il convient de convertir les fractions volumique solide des vases en concentration, par la relation suivante : $C = \phi_f \cdot \rho \cdot \rho_s$, avec ρ : la densité de l'eau (1000 g/l) et ρ_s : la densité solide supposée identique pour les silts, les argiles et les sables (2,65). Ainsi la nouvelle relation entre le seuil d'écoulement et la concentration s'écrit :

$$\tau_{y0} = 5 \cdot 10^{-7} \cdot C^3$$

Ce mélange binaire peut être considéré comme constituant un fluide interstitiel. L'ajout progressif de sable conduit à un mélange ternaire dont la valeur du seuil d'écoulement peut être estimé à partir de la relation proposée par Coussot et Ancey (1999) :

$$\tau_y = \tau_{y0} \left[1 - \frac{\phi_s}{\phi_m} \right]^{-m}$$

avec :

m : coefficient positif compris 1 et 2

ϕ_s : la fraction solide de grains

ϕ_m : la fraction d'entassement maximale des sables dans le mélange eau-fines (estimée à 0,6)

τ_{y0} : le seuil de contrainte du fluide interstitiel à une teneur en eau donnée.

La figure IV-15 illustre l'influence de la teneur sable dans un mélange « eau et fine » sur le seuil d'écoulement du mélange ternaire (eau-vase-grains) pour différentes valeurs de τ_{y0} , respectivement 28 (fig. IV-15a), 63 (fig. IV-15b) et 84 N/m² (fig. IV-15c), en considérant plusieurs valeurs de m (0,5, 1 et 2). Les valeurs de τ_{y0} ont été choisies en fonction du nombre d'essais présentant des valeurs proches de celles choisies quant à la valeur du seuil d'écoulement mesuré pour la fraction fine, ceci afin de comparer le modèle théorique avec les échantillons présentant une teneur en fines enrichies en sable.

Ces figures montrent que lorsque le seuil d'écoulement du fluide interstitiel est faible, l'ajout de particules sableuses modifie lentement le seuil d'écoulement du mélange. En revanche, lorsque le τ_{y0} est plus fort, les modifications de comportement mécanique sont plus importantes et variables, suite à l'ajout de particules plus grosses. Le fluide interstitiel lubrifie les mouvements relatifs des grains et impose son comportement au mélange ternaire. D'autres paramètres, tel que la forme, la distribution, devraient permettre de mieux préciser les variations. Ces résultats valident la démarche de Coussot et Ancey (1999) quant à la modification de la valeur du seuil d'écoulement des fines par l'ajout de sable dans la suspension, leur démarche n'étant pas validée par des essais.

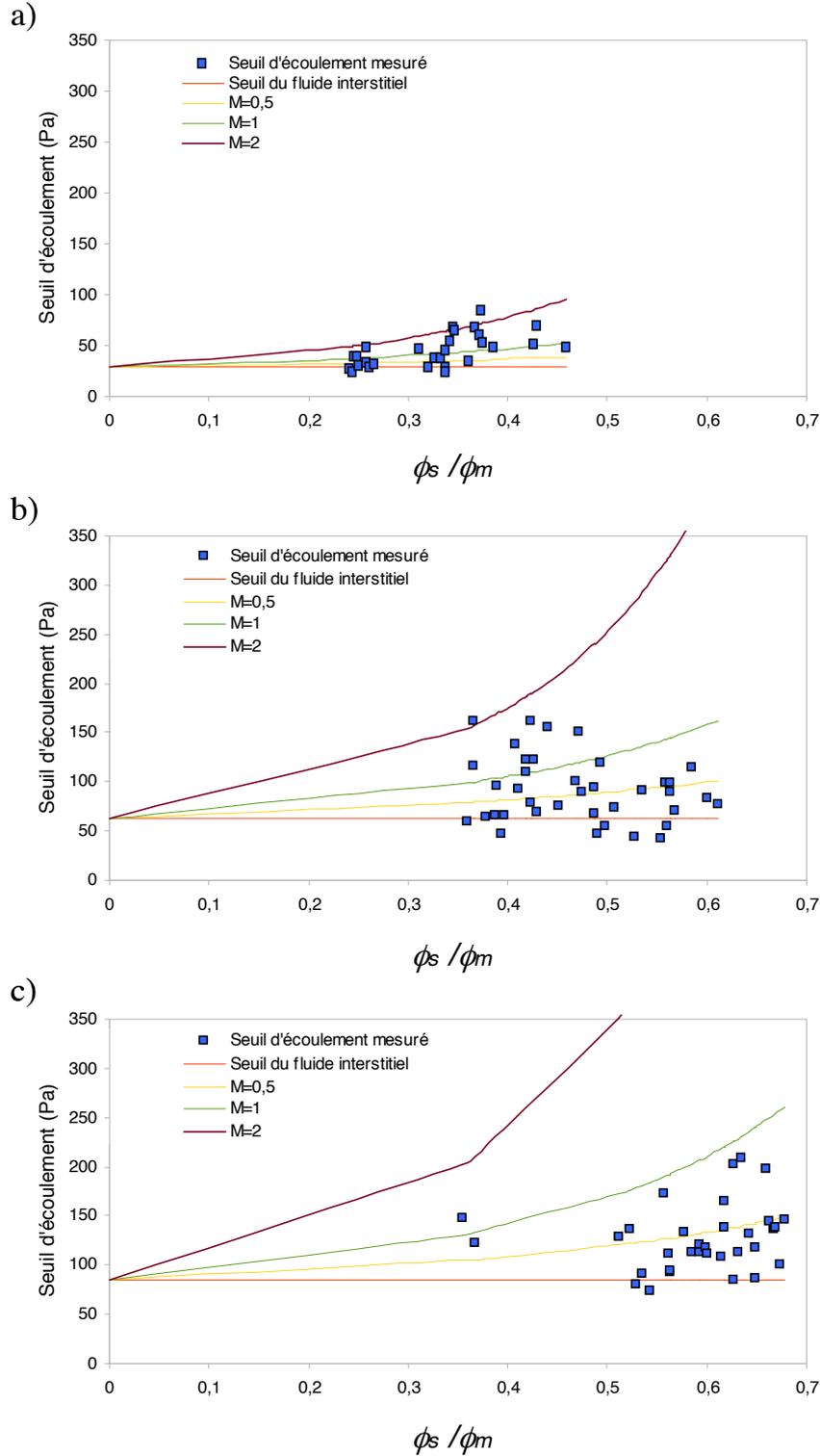


Figure IV-15 : Seuil de contrainte des mélanges eau-vase-sable en fonction de la concentration volumique de grains divisée par la concentration d'entassement maximale

⇒ Finalement, l'ensemble des mesures peut être représenté dans la classification proposée par Cousot et Ancey (1999a) mettant en relation la fraction fine/solide en fonction de la fraction solide totale (fig. IV-16). Les sédiments de type II à V sont clairement associés à la catégorie des fluides à seuil, tandis que la catégorie I se situe à la limite entre les systèmes

hétérogènes et le domaine de fracturation (perte de la continuité du milieu qui caractérise un fluide).

Il est donc possible de déterminer la valeur critique de la fraction fine/solide (Ψ_c), ici $\Psi_c = 0,22$. Cette valeur définit la limite entre un mélange hétérogène, un fluide à seuil et le domaine de fracturation. Cette zone est très particulière (zone D), car la transition entre ces domaines est très rapide pour des variations de concentration faibles. Dans ce domaine, les mélanges correspondent à des suspensions granulaires qui s'écoulent en régime frictionnel du fait d'un fluide interstitiel (eau-fines) peu visqueux. La valeur critique de transition entre les fluides à seuil et le domaine de fracturation (Φ_F) peut également être déterminée. Dans notre cas, elle présente une valeur de 0,52. Au-delà de cette valeur, le mélange se fracture lorsqu'une contrainte lui est appliquée. La valeur critique de transition entre les fluides à seuil et les systèmes hétérogènes (Φ_S) dépend de la valeur de la fraction fine sur la fraction solide.

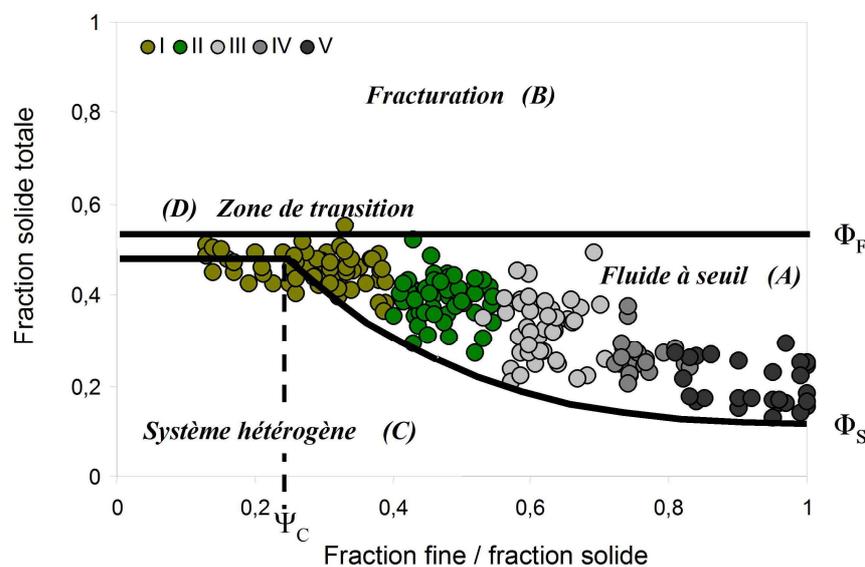


Figure IV-16 : Classification (d'après Coussot et Ancey, 1999a) des divers types de mélanges que l'on peut rencontrer dans les sédiments superficiels de la baie de Marennes-Oléron, à partir de différents volumes de fins et de grains dans de l'eau

IV-4. Cartes de répartition de ces matériaux sur les estrans de la baie en fonction des saisons

A partir des résultats obtenus en laboratoire et des observations de terrains, des cartes des sédiments superficiels des zones intertidales, pour deux saisons contrastées ont été élaborées.

Ces cartes se basent sur la synthèse des données obtenues sur les échantillons prélevés ; d'une part au cours de l'été 2005, 2006 et 2007 ; d'autre part au cours de l'hiver 2007 et 2008.

Les limites des entités sédimentaires ont été réalisées à partir des observations de terrain et de relevés GPS, des orthophotographies littorales disponibles, mais également à

partir de la données bathymétriques. Une représentation par niveau sédimentaire (0 à 1 cm et 1 à 2 cm de profondeur) est proposée afin de mieux appréhender les changements verticaux des faciès sédimentaires.

L'examen de ces cartes montre la grande différence sédimentaire qui existe entre les deux estrans (Est et Ouest) dans la baie, et surtout les changements importants de faciès qui se produisent au cours de l'année, notamment dans la partie Ouest et dans la partie centrale de la baie.

IV-4.1. Situation estivale

En été, les faciès sédimentaires sur les zones intertidales de la baie sont très variés (fig. IV-17). Un fort contraste apparaît entre la partie Ouest et la partie Est de la baie. A l'Est, sur la vasière de Brouage les sédiments sont, quelque soit la profondeur observée, constitués de vase (type V) relativement fluide.

Dans la partie centrale de la baie, le banc d'Agnas et le banc de Lamouroux ont la particularité d'être constitués d'une base sableuse. Ces deux sites présentent une variation de nature de faciès dans le sens de la longueur des bancs, du sud vers le nord. Ainsi, les parties sud des bancs présentent des sédiments de type « sable très vaseux » (type II) à « vase » (type V), tandis que dans leurs parties Nord la sédimentation est plutôt sableuse. Cette particularité peut être expliquée par la circulation résiduelle Nord-Sud des courants de marée, par la présence de sable plus au Nord de la zone mais également par la présence des tables ostréicoles. La sédimentation fine se retrouve aux endroits où la pression ostréicole est également la plus forte. Les tables se comportent comme des obstacles hydrauliques qui freinent les courants sur le fond. Elles constituent des zones de décélération du courant qui favorisent la sédimentation localement (Kervella *et al.*, 2009b; Sornin, 1982).

La partie Ouest de la baie, sur le platier intertidal de l'île d'Oléron, les faciès sédimentaires sont hétérogènes.

Au niveau des bouchots à moules de Boyardville, les sédiments superficiels sont constitués de particules fines. Des vases sableuses (type III) en surface (0-10 mm) recouvrent des vases peu sableuses (type IV) (10-20 mm). Sur le haut de l'estran de cette zone, les sédiments deviennent plus grossiers et correspondent à des sables vaseux (type I). Entre cette zone et jusqu'à la pointe de Bellevue, une large flèche sableuse sépare les deux parties de l'estran. Cette flèche est le résultat de la dérive littoral Nord-Sud qui est très active dans cette partie de la baie (Tesson, 1973).

Entre la pointe de Bellevue et le Château d'Oléron, il est possible d'observer un gradient sédimentaire cross-shore correspondant au passage d'un faciès sableux (dans la partie basse de l'estran) à un faciès plus vaseux (sur la partie haute de l'estran). La sédimentation grossière de la partie basse constitue le prolongement de la flèche sableuse de la pointe de Bellevue. En remontant sur l'estran, dans les zones ostréicoles, la fraction fine dans les sédiments augmente et constitue des sables vaseux (type I) puis des sables très vaseux (type II). Il existe une vaste bande de vases sableuses (type III) intercalée entre les zones ostréicoles et la partie haute de l'estran. Ces sédiments, d'une dizaine de millimètres d'épaisseur, reposent sur des sables très vaseux (type II). La délimitation spatiale de ces sédiments coïncide avec celle des herbiers à zostères qui occupent une grande partie de cet estran.

En dessous du château d'Oléron, la sédimentation est beaucoup plus fine et est caractérisée par la présence de vases sableuses (type III) sur les 20 mm superficiels. Il est à noter la présence de sables très vaseux (type II) sur la partie haute de l'estran, à partir de 10 mm de profondeur.

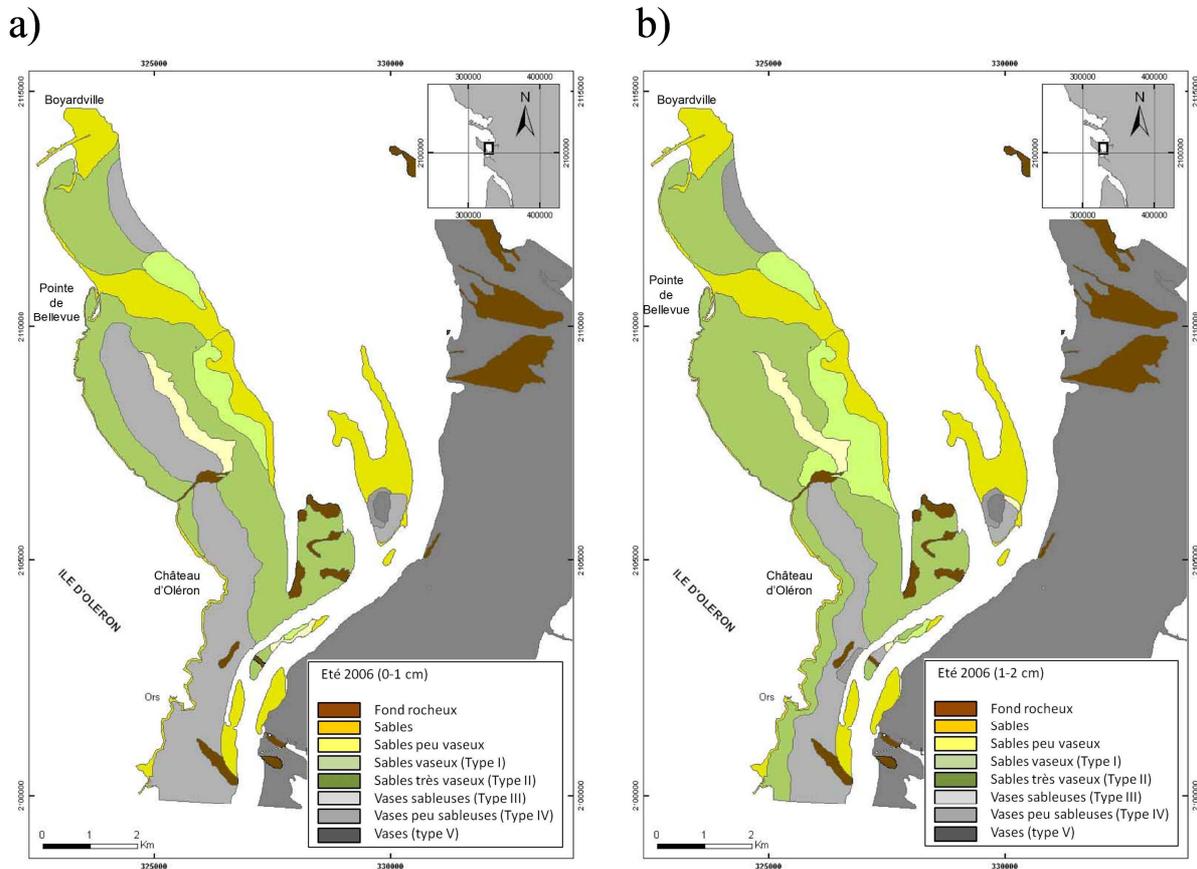


Figure IV-17 : Répartition des faciès sédimentaires superficiels de la baie de Marennes-Oléron, a) pour le premier centimètre et b) pour le second centimètre, en période estivale

III-4.2. Situation hivernale

En hiver, la vasière de Brouage reste constituée de « vases » de type V. En revanche, concernant la partie centrale et la partie Ouest de la baie, la situation est tout à fait différente (fig. IV-18).

Dans la partie centrale, le banc de Lamouroux présente une sédimentation de surface uniquement constituée de sable. Le banc d'Agnas montre également une sédimentation sableuse (sables à sables peu vaseux), sauf dans sa partie Sud, où les faciès sédimentaires restent les mêmes qu'en été. Ces changements semblent liés à l'arrêt des activités ostréicoles et à l'enlèvement des tables à huîtres au cours de l'hiver.

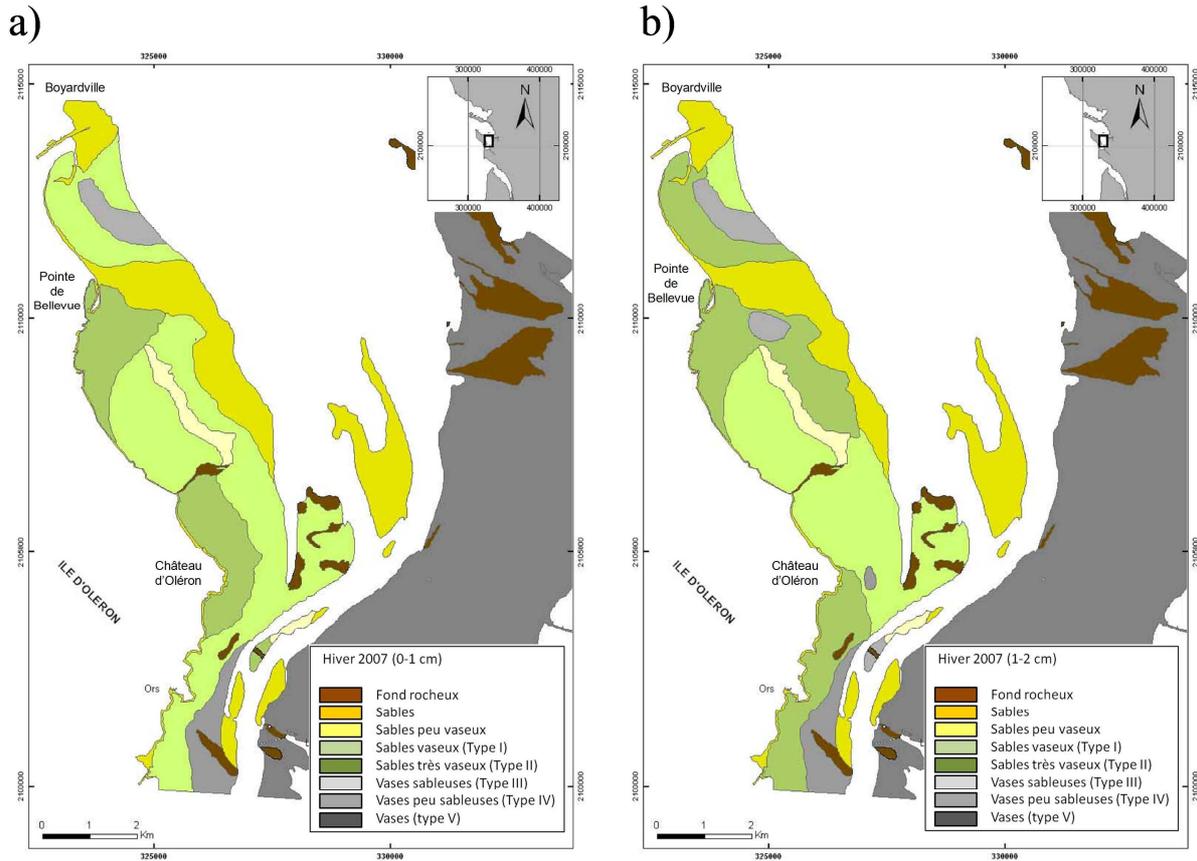


Figure IV-18 : Répartition des faciès sédimentaires superficiels de la baie de Marennes-Oléron, a) pour le premier centimètre et b) pour le second centimètre, en période hivernale

Dans le secteur de Boyardville, la sédimentation de surface est plus grossière qu'en été. Les sédiments de surface correspondent à des « sables très vaseux ».

Entre la pointe de Bellevue et le Château d'Oléron, les changements sont également conséquents. Sur la partie basse de l'estran, une large bande sableuse est visible. Elle est bien plus large que celle qui existe en été. Sur le reste de l'estran, les vases sableuses (type III) estivales des zones à herbiers sont remplacées par des sables vaseux (type I).

En dessous du château d'Oléron, les vases sableuses (type III) sont remplacées par des sables très vaseux, sauf aux abords du coureau central. Près du coureau, les sédiments sont constitués de sables très vaseux (type II).

IV-5. Conclusions

L'étude des sédiments à la fois par microgranulométrie et par rhéométrie a mis en évidence les spécificités des sédiments de la zone intertidale de la baie de Marennes-Oléron.

Suite à l'analyse de leur nature texturale, il apparaît que ces sédiments présentent un rapport constant entre les argiles et les silts de 0,17. Cette caractéristique sédimentologique permet de les différencier de ceux des autres baies en lui fournissant un indicateur

« génétique ». Cette caractéristique est liée aux conditions hydrodynamiques, aux sources sédimentaires, aux éléments morphodynamiques, à l'impact anthropique, etc. La limite entre les sédiments cohésifs et les non cohésifs est estimée à 60% de sable.

L'analyse du comportement des sédiments cohésifs prélevés à l'émersion, montre qu'ils sont apparentés à des fluides à seuil rhéofluidifiant, très fluides à pâteux. Le rôle de la concentration (*i.e.* la teneur en eau) et celui de la teneur en sable ont été clairement démontrés. Dès lors que la concentration en sable reste faible (< 30 %), le mélange adopte le comportement du fluide interstitiel avec des seuils contraintes dépendant essentiellement de la teneur en eau et probablement des conditions physico-chimiques. Au-delà de cette teneur, le mélange adopte un comportement ternaire influencé par la fraction sableuse.

Aucune différence comportementale n'a été observée entre les vases hors zones ostréicoles et les biodépôts.

En couplant les deux analyses, physique et mécanique, cinq types sédimentaires ont été identifiés (types I à V) et sont caractéristiques des zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron.

Les cartes saisonnières des sédiments de surface des zones intertidales de la baie complètent les cartes antérieures (Hily, 1977; Weber, 2004) et mettent ainsi en évidence les variations spatio-temporelles des faciès sédimentaires sur les différents estrans de la baie, notamment au niveau des zones ostréicoles de la partie Ouest et centrale de la baie.

Ces variations sont induites par la géomorphologie, l'hydrodynamisme local, mais aussi par les activités anthropiques (culture des huîtres et des moules) qui se développent sur certains sites. Un remaniement important des sédiments de surface dans certaines zones de la baie, se produit essentiellement au cours de l'hiver. Une disparition *quasi* complète de la couverture de sédiments cohésifs sur le banc de Lamouroux et sur la côte Est de l'île d'Oléron est constaté au cours de l'hiver, au profit de sédiments sableux.

Partie V : Mécanismes hydro-sédimentaires sur les zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron

V-1. Introduction

L'étude bibliographique de la baie a montré que les connaissances hydro-sédimentaires actuelles étaient fragmentaires, surtout dans sa partie occidentale. Dans la préparation de ce travail, il a été décidé de réaliser une vaste étude hydro-sédimentaire sur plusieurs points stratégiques de la baie de Marennes-Oléron, avec un effort marqué sur la partie Ouest et sur la partie centrale.

Cette étude s'intéresse aux mécanismes hydro-sédimentaires qui contrôlent l'évolution morphologique de certaines zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron (littoral est de l'île d'Oléron et vasière de Monportail-Brouage) sur des échelles de temps allant du *quasi* instantané (de l'ordre de la minute) au relatif « moyen terme » (de l'ordre de plusieurs années). Les objectifs sont multiples. Il s'agit de :

- comprendre les mécanismes d'érosion et de dépôt qui ont lieu sur les estrans de la baie de Marennes-Oléron en fonction des contraintes hydrodynamiques (échelle semi-diurne et événementielle) et des propriétés mécaniques et physiques des sédiments superficiels ;
- identifier les cycles érosion/dépôt à l'échelle de l'année ;
- préciser les relations entre les apports de la Charente et la sédimentation sur la vasière de Monportail-Brouage ;
- déterminer l'origine des changements de faciès sédimentaires sur la zone intertidale de la partie Ouest de la baie ;
- interpréter la structuration verticale des sédiments à long terme.

Des appareils de mesure à haute fréquence (altimètres in situ ALTUS et courantomètres ADV) ont été installés en plusieurs points de la baie. En complément, des prélèvements mensuels de sédiments ont permis de connaître les paramètres texturaux et comportementaux de l'interface. De plus, des petites carottes de quelques dizaines de centimètres ont été réalisées manuellement, à l'immersion, sur la vasière de Monportail-Brouage et sur le haut du littoral Est de l'île d'Oléron. Ces carottes ont fait l'objet d'analyses radiographiques (SCOPIX) et d'une datation par radioélément (Pb210), ceci afin de comprendre le processus de la sédimentation sur le long terme.

V-2. Littoral Est de l'île d'Oléron

Les sites de mesures hydro-sédimentaires sur le littoral Est de l'île d'Oléron sont positionnés sur la carte suivante :

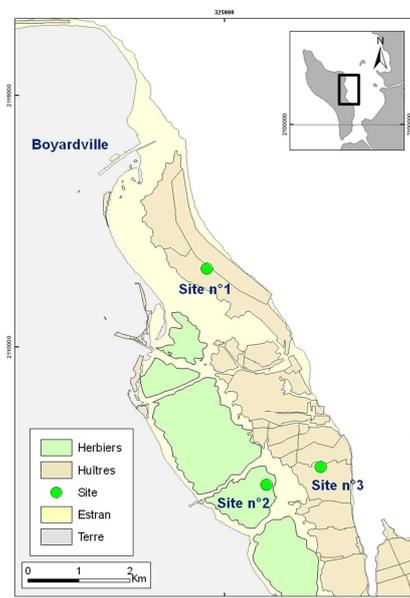


Figure V-1 : Position des sites de mesures hydrosédimentaires sur le littoral Est de l'île d'Oléron

V-2.1. Description des vagues

NB : Concernant le calcul des contraintes sur le fond générées par les vagues (τ_w) et les courants (τ_c), une longueur de rugosité de 0,7 mm a été choisie, correspondant à un mélange sable/vase selon Soulsby, ceci conformément avec l'analyse texturale des sédiments des zones de mesures. Cette approche a été préférée à l'approche préconisée par Nikuradse (1933), qui nécessite de connaître la taille moyenne des grains à chaque instant.

V-2.1.1. Caractéristiques annuelles

Sur l'ensemble de l'année d'observation (tab. V-1 et fig. V-2), les vagues ne dépassent pas 0,20 m de hauteur dans 81 à 76% du temps sur le site Boyardville (Site n°1) et sur le site des Doux bas (site n°3). En revanche, sur les Doux hauts (site n°2) cette valeur atteint à 88%. Quant aux vagues d'une hauteur supérieure à 0,4 m, elles représentent le même pourcentage sur les trois sites (4 à 5 %).

Les vagues, d'une période supérieure à 11 s, sont très fréquentes (41 %) sur le haut de l'estran (site n°2), contrairement aux Doux bas (16 %) et à Boyardville (7 %). La partie basse de l'estran (site n°2) et le secteur de Boyardville (site n°1) sont régulièrement soumis à des vagues de courtes périodes.

Les pourcentages de temps durant lequel les τ_w inférieures à 0,3 N/m² affectent les fonds sont quasiment identiques (67 à 72 %) sur les trois sites. C'est également le cas pour les contraintes (τ_w) supérieures à 0,6 N/m² (13 à 16 %). En revanche, la partie haute de l'estran montre une proportion en τ_w supérieure à 1 N/m² deux fois plus fréquemment (9%) que les deux autres sites.

Site	Période de mesure	Période (s)				Hauteur significative (cm)				Contrainte de frottement (N/m ²)			
		<5	5-8	8-11	>11	<20	20-40	40-70	>70	<0,3	0,3-0,6	0,6-1	>1
N°1 (Boyardville)	06/04/07-29/03/08	31	38	24	7	81	16	3	<1	67	20	9	4
N°2 (Doux haut)	04/04/07-08/04/08	13	20	25	43	88	10	2	<1	72	11	7	9
N°3 (Doux bas)	04/04/07-01/02/08 (*)	19	35	30	16	76	19	4	<1	68	18	8	5

Tableau V-1 : Tableau récapitulatif des caractéristiques bimensuelles des vagues sur les années 2007 et 2008 pour le site de Boyardville (site n°1), le site des Doux haut (site n°2) et pour le site des Doux bas (site n°3) (Les données relatives aux vagues fournies par cet ALTUS ont été considérées comme non valides à partir du 01/02/08. Elles n'ont donc pas été prises en compte dans ces calculs)*

L'analyse des enregistrements en continu des vagues et des contraintes sur ces trois zones (fig. V-3) indique que lors de tempêtes, les τ_w peuvent devenir très fortes. Des valeurs maximales comprises entre 2 et 3 N/m² ont été enregistrées sur le site de Boyardville (site n°1), tandis que ces contraintes peuvent atteindre 4 N/m² sur la partie basse (site n°2) et haute de l'estran des Doux (site n°3).

Les parties basses de cet estran sont exposées à des vagues multispectrales dont les hauteurs et les contraintes qu'elles génèrent sur le fond peuvent être importantes temporairement. Sur la partie haute de l'estran, des vagues de hauteurs plus faibles, mais de périodes plus longues, peuvent se propager et provoquer des contraintes de fond tout aussi importantes que sur les parties basses. L'ensemble de cette zone peu être qualifiée de très énergétique.

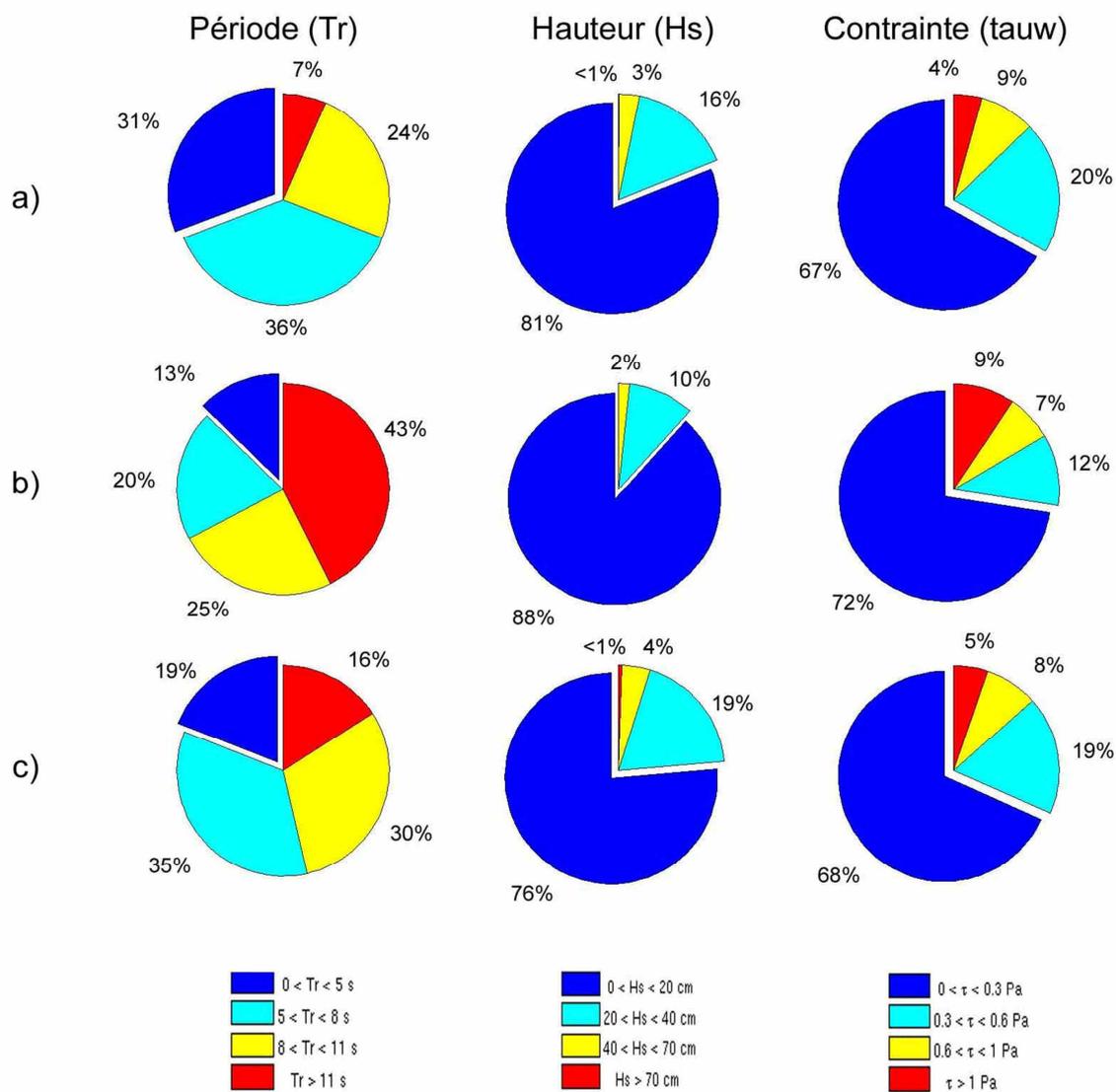


Figure V-2 : Caractéristiques des vagues (H_s , T_r et τ_w) (a) pour la période du 06/04/07 au 28/03/08 sur le site de Boyardville (site n°1), (b) entre le 04/04/07 et le 08/04/08 sur les Doux haut (site n°2) et (c) entre le 04/04/07 et le 01/02/08 sur les Doux bas (site n°3)

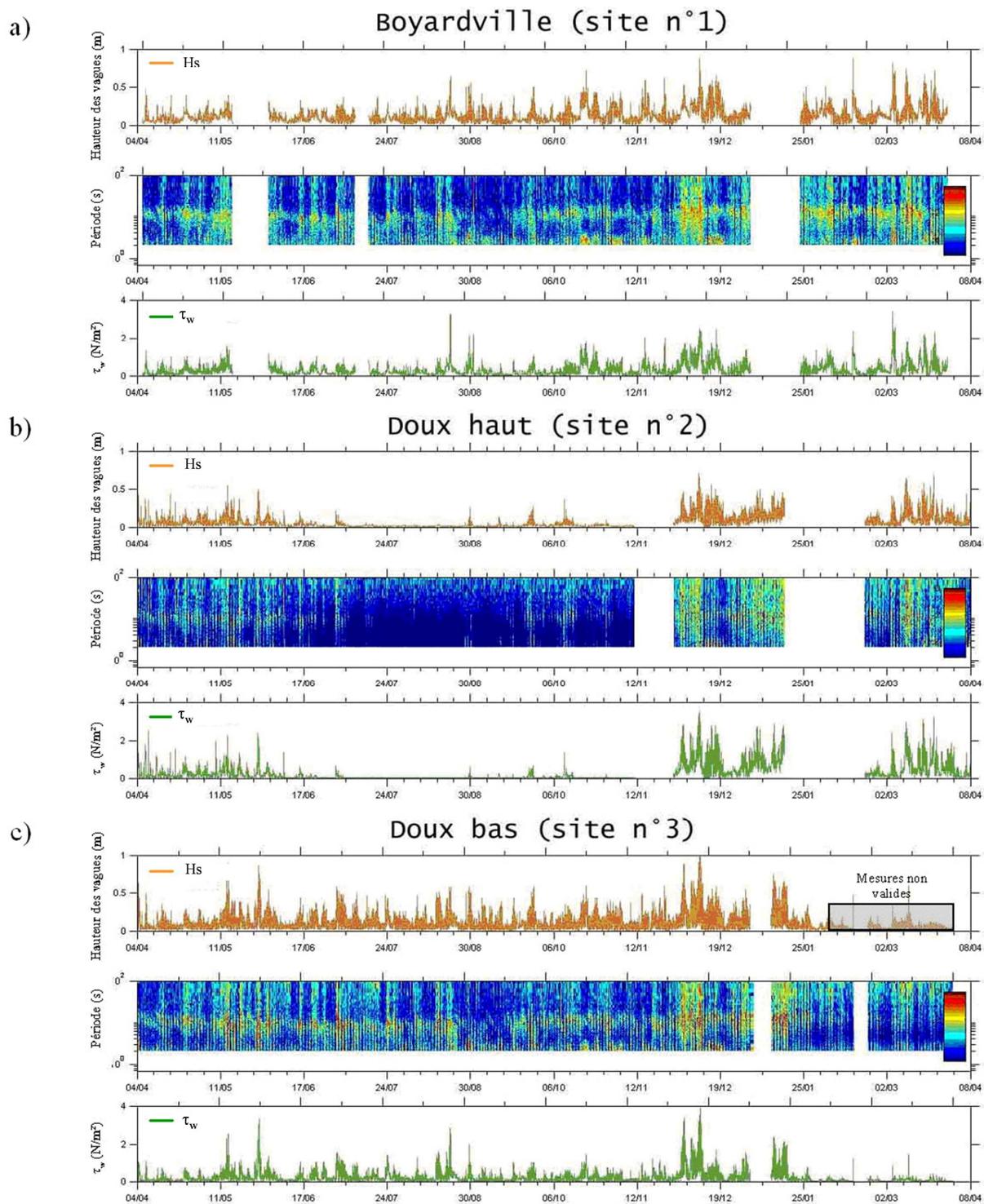


Figure V-3 : Enregistrement en continu des paramètres physiques des vagues (H_s , T_r et τ_w) (a) à Boyardville (site n°1), (b) sur le bas (site n°2) et (c) sur le haut des Doux (site n°3), entre le 04/04/07 et le 08/04/08

V-2.1.2. Caractéristiques bimensuelles

Pour l'ensemble des sites, la répartition bimensuelle des caractéristiques des vagues (Tr , H_s et τ_w) fait apparaître un contraste entre la période hivernale (décembre à mars) et le reste de l'année fig. V-4. Il est encore plus marqué sur le haut de l'estran (Doux haut).

En période hivernale, les contraintes de frottement des vagues sur les fonds (τ_w) sont fortes ($>1 \text{ N.m}^2$) pendant environ 13 à 17% du temps d'immersion. Sur le site n°2, ce chiffre atteint même 36% pour la période concernant le mois de décembre 2007 et le mois de janvier 2008. Cependant, ce résultat est à revoir à la baisse, car l'appareil n'a pas enregistré les 10 derniers jours du mois de janvier qui correspondaient à une période calme. Sur l'ensemble des sites, les périodes calmes ($H_s < 20 \text{ cm}$) ne représentent que 60% du temps.

Le reste de l'année, le haut de l'estran n'est quasiment pas soumis à l'agitation des vagues. Les vagues d'une hauteur inférieure à 0,2 m représentent environ 98 % du temps d'immersion et elles provoquent des contraintes de frottement τ_w souvent très faibles ($0,3 \text{ N/m}^2$). Les vagues n'influencent pas ou très peu cette zone. En effet, elles sont atténuées plus bas sur l'estran, ou bien elles ne se propagent pas jusqu'au site des Doux haut (site n°2), par manque d'énergie.

Le site de Boyardville (n°1) est marqué par une *quasi* absence de vagues entre avril et mai (88 % inférieure à 0,2 m). Les vents sont de secteur Ouest (annexe 2) et les vagues n'ont pas assez d'énergie pour être complètement diffractées dans cette zone. En revanche, entre le mois d'août et le mois de novembre, ce site subit de nouveau leur action. Les contraintes de frottement τ_w supérieures à $0,6 \text{ N.m}^2$ représentent environ 6 à 7% du temps. Le vent est établi aux secteurs Est à Nord-Est, générant des clapots affectant fortement cette zone.

En revanche, sur le bas de l'estran (site n°3), l'agitation de la surface est quasiment continue. Cette zone est relativement bien exposée et reçoit des vagues de secteur Nord-ouest, Nord à Est.

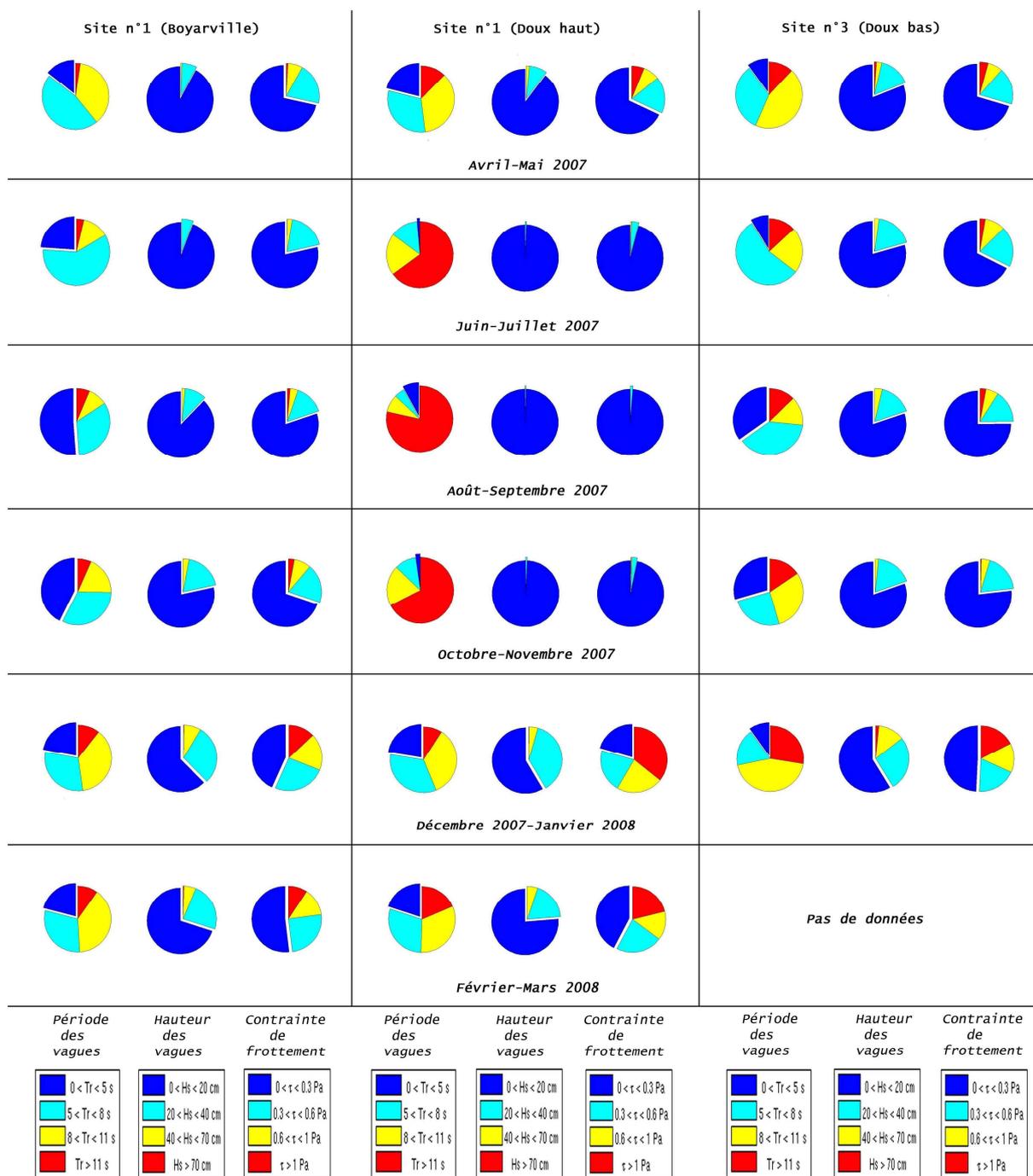


Figure V-4 : Caractéristiques bimensuelles des vagues (H_s , T_r et τ_w) entre avril 2007 et mars 2008 sur le site n°1, 2 et 3 entre avril 2007 et mars 2008

V-2.1.3. Limitation de la hauteur des vagues

Au niveau des estrans, la hauteur maximale des vagues (H) dépend en particulier de la hauteur d'eau (h). Le rapport H/h varie en fonction de la pente (β) de l'estran et du paramètre de frottement (f_w). Wells et Kemp (1986), Le Hir *et al.* (2000) ou encore Silva Jacinto (Silva Jacinto, 2002) ont montré que dans le cas des vasières, le rapport H/h était inférieur au rapport limite usuel, considéré fréquemment comme critère de déferlement de la houle ($H = 0,8h$) sur les plages. La raison de cette saturation peut être recherchée dans la dissipation par frottement près du fond (Le Hir, 2000), dans le cas des estrans vaseux.

Le calcul du rapport H/h permet de déterminer la hauteur maximale des vagues sur un platier intertidal, pour une profondeur donnée :

$$\left(\frac{H}{h}\right)_{\text{lim}} = \frac{15 \pi \beta}{4 f_w}$$

L'analyse des hauteurs significatives (H_s) des vagues mesurées sur le platier intertidal de la partie ouest de la baie, pendant 12 mois d'enregistrement, met en évidence la relation linéaire qui relie H_s avec la hauteur d'eau (fig. V-5).

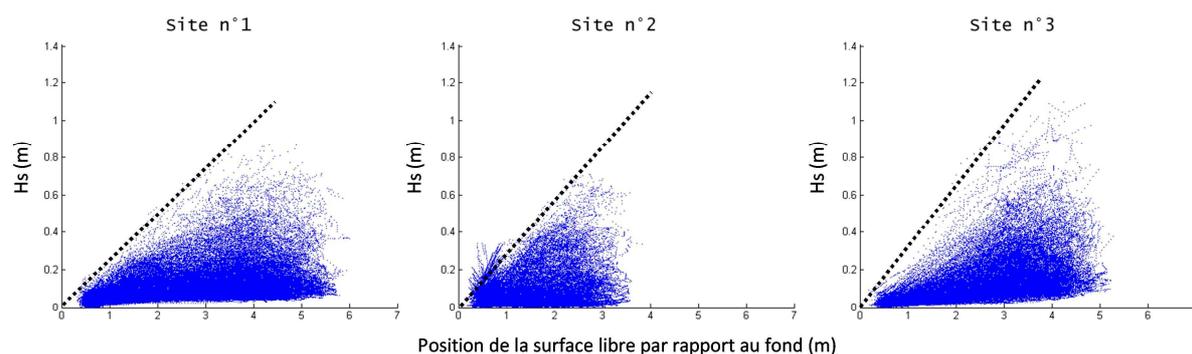


Figure V-5 : Corrélation entre la hauteur significative des vagues (H_s) et avec la hauteur d'eau (h) mesurée sur le site n°1 (Boyardville), sur le site n°2 (Doux haut) et sur le site n°3 (Doux bas), entre le mois d'avril 2007 et le mois d'avril 2008. En pointillé, relation linéaire du type $H_s = \beta h$

Sur chacun des sites étudiés, la hauteur d'eau limite le développement des vagues. Cette limitation est variable suivant la zone observée (tab. V-2). En arrière des bouchots de Boyardville (site n°1), les hauteurs significatives maximales des vagues ne peuvent dépasser 26 % de la hauteur d'eau, tandis que cette valeur est proche de 30 % sur la zone des Doux hauts (site n°2) et elle atteint 33 % dans la partie des Doux bas (site n°3). De ce fait, la hauteur maximale des vagues ne peut dépasser 1,6 m. sur le site n°1, 1,2 m sur le site n°2 et 1,7 m sur le site n°3.

L'analyse topographique de la vasière, réalisée à l'aide des isobathes, indique que ces trois sites ont des pentes (β) différentes, ce qui contribue aux variations du paramètre de frottement (f_w) (tab. V-2). Ainsi, la valeur du paramètre de frottement (f_w) sur le site n°1 est

très élevée (0,127), tandis que sur le site n°2 et sur le site n°3, elle est plus faible (0,043 et 0,071).

Site	Hs/h	β	f_w	h_{max} (m)	H_{max} (m)
n°1	0,26	0,0028	0,127	6,0	1,6
n°2	0,30	0,0011	0,043	4,0	1,2
n°3	0,33	0,0020	0,071	5,2	1,7

Tableau V-2 : Rapport Hs/h, valeur de la pente (β), paramètre de frottement (f_w), hauteur d'eau maximale (h_{max}) et hauteur significative maximale des vagues (H_{max}) calculée sur le site n°1, n°2 et n°3

V-2.2. Mécanismes sédimentaires à l'échelle semi-diurne

Entre 76 et 88% du temps, la zone intertidale de la partie Ouest de la baie est calme ($H_s < 0,2$ m). Suivant la nature des fonds et la quantité de matière en suspension, l'action des contraintes de frottement des courants (τ_c), sur les mécanismes de dépôt et d'érosion varie en fonction des vitesses des courants induits par la marée.

NB : Une situation en mortes-eaux (coefficient de 37 à 41) et une situation en vives-eaux (coefficient de 107 à 112) sont présentées ci-après, ces deux séquences ayant été choisies lors de périodes durant lesquelles la hauteur des vagues était faible ($H_s < 0.1$ m).

V-2.2.1. En bas de l'estran

Sur le bas de la zone des Doux (site n°3), les contraintes τ_c sont beaucoup plus fortes en flot qu'en jusant (tab. V-3), tandis que les vitesses de courant maximales sont plus fortes pendant le jusant de vives-eaux (VE) et quasiment identiques en mortes-eaux (ME).

ME/VE	Vitesse max (m/s)		Tau c max (N/m ²)		Turbidité max (mg/l)
	Flot	Jusant	Flot	Jusant	
ME	0,20	0,16	0,30	0,20	20
VE	0,30	0,40	0,70	0,30	50-100

Tableau V-3 : Caractéristiques des courants de marée maximum et de la turbidité associés sur le bas de l'estran en période de mortes-eaux (ME) et en vives-eaux (VE), en période calme

Les turbidités enregistrées près du fond sont relativement faibles sur cette partie de l'estran. Les maxima sont mesurés au moment des étales de marée basse. En ME, la turbidité maximale est très faible, environ 20 mg/l, tandis qu'en VE elle est plus forte et peut atteindre 50 à 100 mg/l.

Les enregistrements altimétriques permettent d'observer les phénomènes d'érosions/dépôts à l'échelle d'une marée (fig. V-5 et V-6). Il apparaît qu'en ME, des dépôts de faibles épaisseurs (2 à 4 mm) se produisent, associés à la décantation de sédiments fins.

Des périodes stables, sans dépôts aux étales de marée, alternent également avec des périodes d'érosion et de dépôts.

Cependant, les séquences peuvent être reliées également à un transport par charriage des sables fins. En effet, les sédiments de surface sont constitués de sables à des sables peu vaseux dans cette zone. Les vitesses maximales du courant en ME (0,20 m/s) sont compatibles avec une érosion et un transport par charriage de ce type de sédiment. Ces particules ne participent donc pas à la turbidité dans la colonne d'eau et ne sont pas prises en compte par le turbidimètre. Les dépôts sont érodés pour des τ_c d'environ 0,2 N/m².

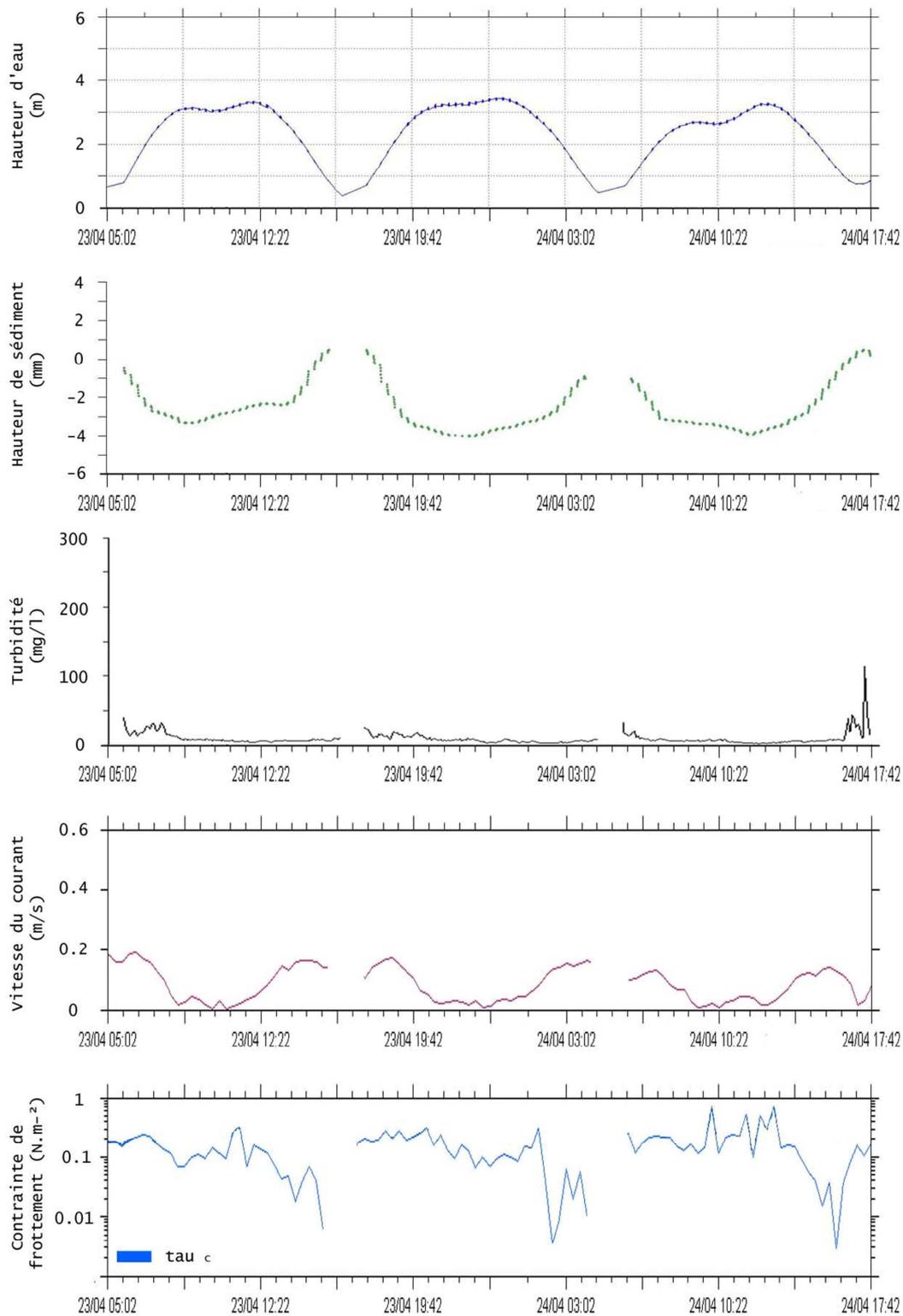


Figure V-6 : Variations des paramètres hydrodynamiques (hauteur d'eau, vitesse du courant et contrainte du courant sur le fond) et sédimentaires (turbidité et hauteur du sédiment) pendant une marée mortes-eaux (ME) sur le site n°3 (Doux bas)

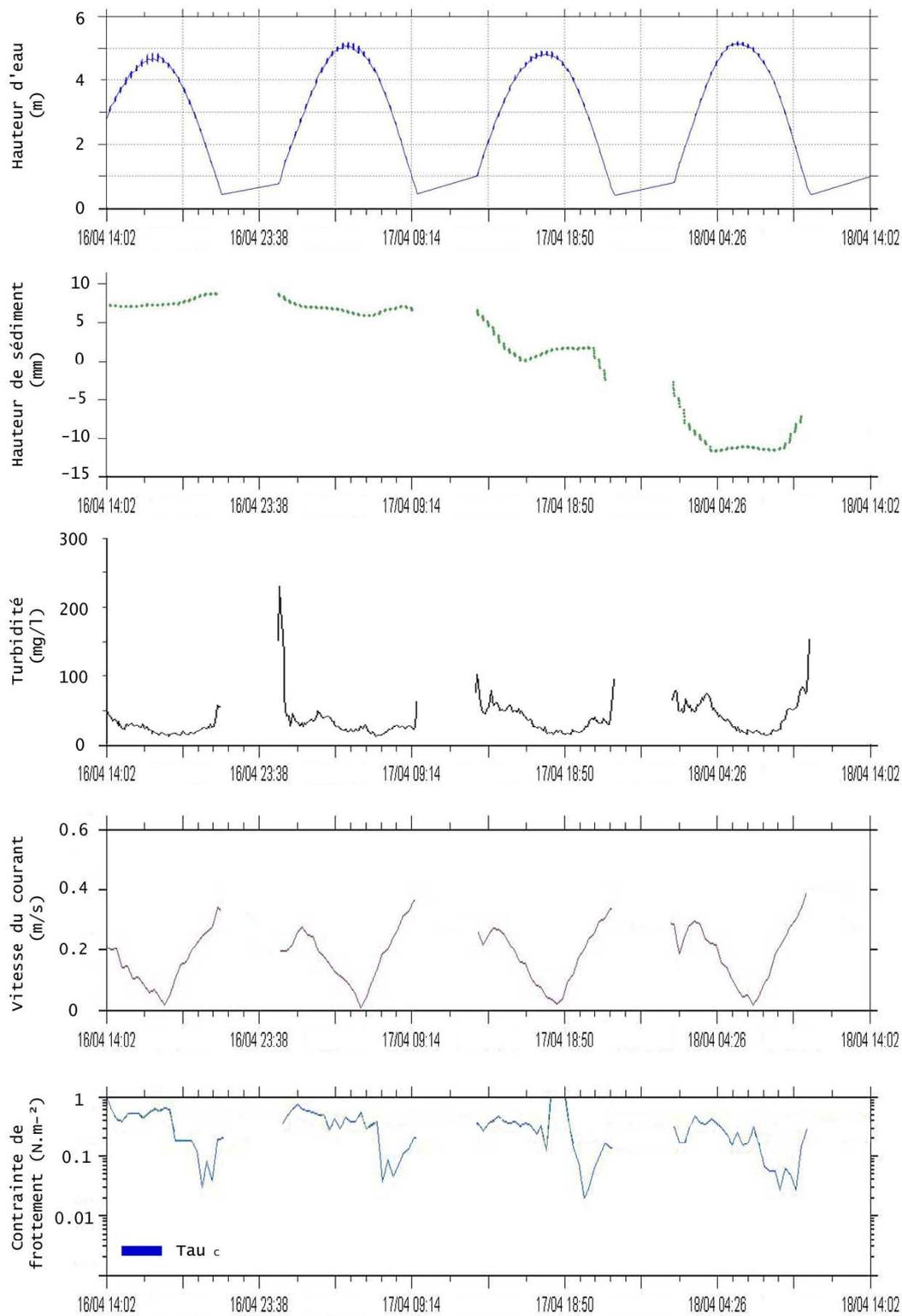


Figure V-7 : Variations des paramètres hydrodynamiques (hauteur d'eau, vitesse du courant et contrainte du courant sur le fond) et sédimentaires (turbidité et hauteur du sédiment) pendant une marée de vives-eaux (VE) sur le site n°3 (Doux bas)

V-2.2.2. En haut de l'estran

Sur le haut de l'estran (site n°2), seules des données altimétriques et marégraphiques sont disponibles. Du fait d'une marée asymétrique, le flot présente une phase de ralentissement dans sa première moitié, induisant une décantation des MES et un dépôt d'environ 2-3 mm (fig.V-8). Aux étales de marée basse, des dépôts (2 à 4 mm) sont observés et sont érodés au cours de 2-3 premières heures du flot. Cette sédimentation n'est pas pérenne.

En VE, la courbe de marée est symétrique et il n'y a pas de dépôt autour de l'étales de marée haute. En revanche, autour des étales de marée basse, des dépôts de 2 à 4 mm se produisent et peuvent être érodés au cours des 2 premières heures du montant.

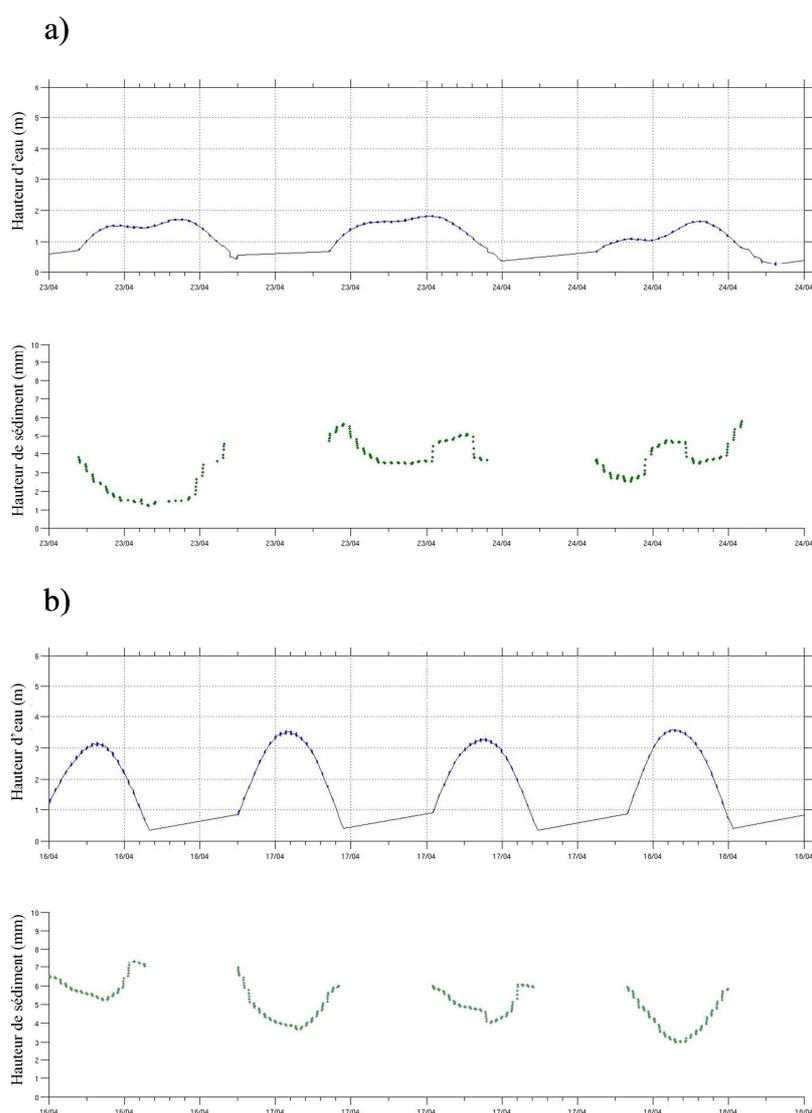


Figure V-8 : Variations des hauteurs du sédiment (a) au cours de la marée, pendant une mortes-eaux (ME) et (b) une vives-eaux (VE), sur le site n°2 (Doux haut)

V-2.3. Impact des vagues sur la stabilité des sédiments

Les vagues sont souvent présentes dans cette partie de la baie et engendrent des contraintes de frottement sur le fond pouvant être supérieures à 3 N/m^2 . La sédimentation de cette zone est donc fortement liée à l'agitation locale. Afin d'identifier l'impact des vagues sur les sédiments de l'Ouest de la baie, deux événements sont étudiés, correspondant à des situations de vents d'ouest à Sud-Ouest, à des vitesses moyennes supérieures à 18 m.s^{-1} .

V-2.3.1. En bas de l'estran

Au moment des tempêtes de début décembre 2007, les sédiments superficiels (0-2 cm) du site n°3 sont composés de 82% de sables, 15% de silts et 3% d'argiles, correspondant à des sables peu vaseux (fig. V-9).

La réaction de l'interface sédimentaire, sous les contraintes générées par les vagues, est différente de ce qui se passe en haut de l'estran (fig. v-8). Lors du premier coup de vent, les contraintes de frottement des vagues (τ_w) atteignent des valeurs proches de 4 N/m^2 ($2,8 \text{ N/m}^2$ pour les vagues longues, et $1,4 \text{ N/m}^2$ pour les vagues courtes). Au cours du deuxième évènement, ces contraintes sont plus faibles (environ 2 N/m^2). Lors du troisième épisode, elles atteignent de nouveau des valeurs proches de 4 N/m^2 . Il n'y a que très peu de moments « calmes » au cours de la période observée.

Le premier évènement érosif affecte environ 15 à 20 mm de l'interface, à partir du 1^{er} décembre. Les érosions se produisent au moment de l'étale de marée haute, lorsque les contraintes de frottement des vagues sont les plus importantes. Puis, au bout de 3 marées, ce schéma se modifie, des dépôts ayant lieu au cours du flot et lors des étales de marée basse, l'organisation des dépôts devenant chaotique.

Ce schéma se reproduit au cours des deux évènements érosifs suivants. Les épaisseurs de sédiments érodés sont parfois moins importantes que celles des dépôts, alors que les contraintes restent élevées ($\tau_w \text{ max} = 4 \text{ N/m}^2$ pour le troisième évènement).

Bien que les contraintes (τ_w) soient relativement élevées, les érosions dans les sédiments sableux restent faibles. Les grains de sables ne sont pas tout le temps transportés dans la colonne d'eau, et à la faveur d'affaiblissement des vitesses de courant, ils sont transportés par charriage près du fond. Ces séquences coexistent et alternent également avec des séquences de dépôts, correspondant aux observations.

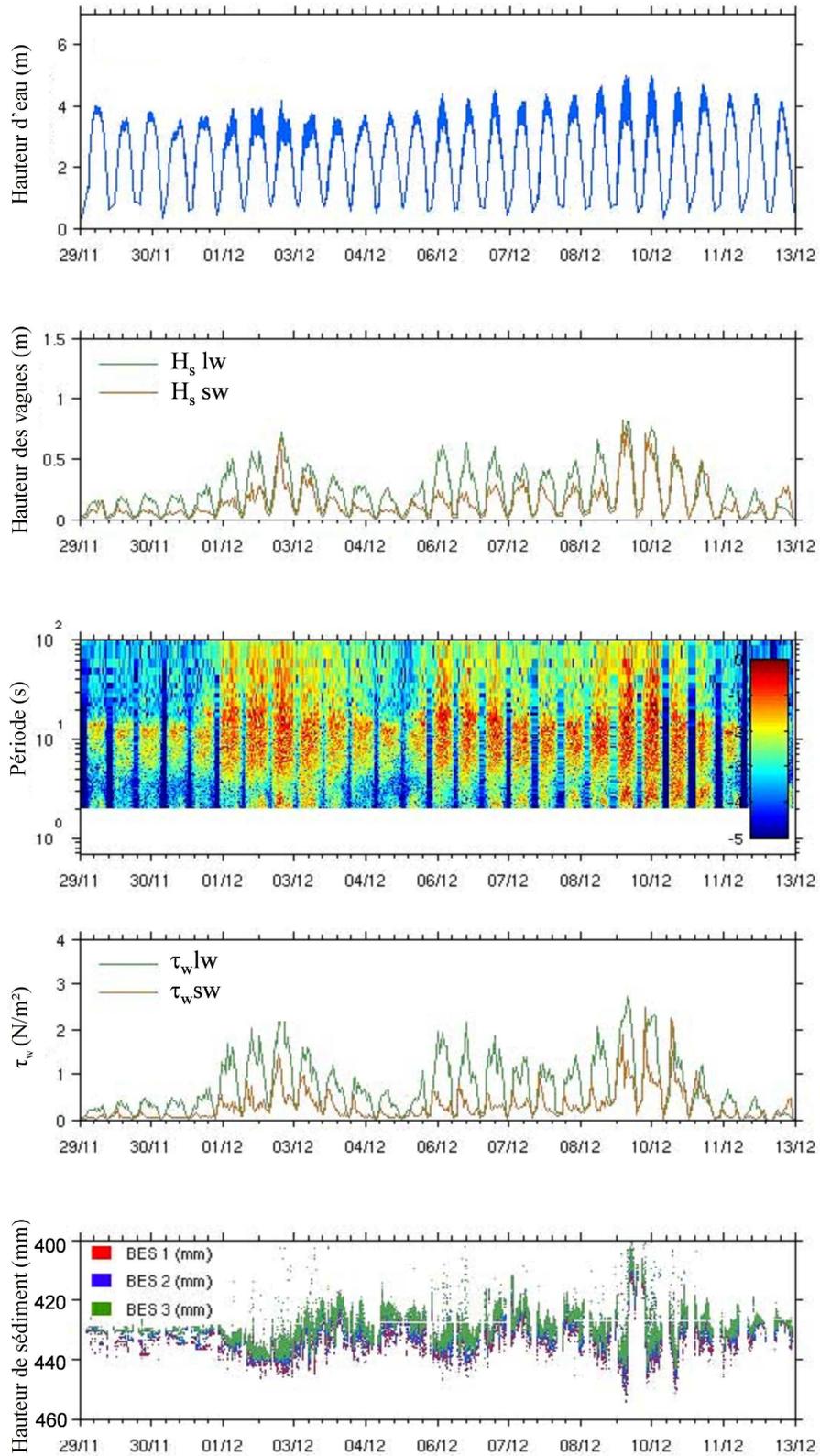


Figure V-9 : Séquences érosives, liées à l'activité des vagues, sur le site n°3 (Doux bas), entre le 29/11/07 et le 13/12/07

V-2.3.2. En haut de l'estran

Au premier jour de l'enregistrement étudié, l'interface sédimentaire du site n°2 était caractérisée par : (1) un premier niveau (0-10 mm) non-cohésif composé de 74% de sable, 23% de silt et 3% d'argile, avec une teneur en eau d'environ 56% ($c = 1139 \text{ g/l}$). (2) un second niveau (10-20 mm) sablo-vaseux (type I) composé de 59% de sable, 36% de silt et 6% d'argile, avec une teneur en eau de 56% et un seuil d'écoulement élevé ($\tau_y=203 \text{ Pa}$), qui reposait sur une interface consolidée.

Entre le 29/11/07 et le 13/12/07, les différents coups de vent provoquent 3 épisodes érosifs (fig. V-10). Juste avant, un dépôt de 5 mm d'épaisseur se produit en l'absence de vagues. Dès le premier événement (01/12-02-/12), les contraintes de frottement des vagues sur le fond dépassent la valeur de $2,6 \text{ N/m}^2$ ($1,5 \text{ N/m}^2$ pour les vagues longues (τ_{lw}) et $1,1 \text{ N/m}^2$ pour les vagues courtes (τ_{sw})). Sur les deux premières marées, l'action combinée de ces contraintes conduit à l'érosion de 15 mm de sédiment. Lors des marées suivantes, l'action des vagues ne permet pas une érosion plus conséquente. A la fin de ce premier coup de vent, un dépôt d'environ 5-6 mm se produit lorsque les contraintes de frottement des vagues (longues et courtes) sont inférieures à 2 N/m^2 .

Le deuxième coup de vent (06/12) lève des vagues d'une hauteur de 0,4 m. Ces dernières provoquent des contraintes de frottement des vagues sur le fond (τ_w) moins fortes que lors du premier événement ($2,2 \text{ N/m}$), les vagues courtes et longues contribuant en proportion égale à cette contrainte. Le dépôt post-tempête est alors érodé entièrement et une petite partie de l'interface est affectée (environ 5 mm), le front d'érosion ne se propageant pas plus profondément. A la fin de l'événement, un léger dépôt (3 mm) post-tempête se produit.

Lors du troisième épisode érosif (08/12-11/12), ce nouveau dépôt est érodé totalement. Les contraintes de frottement atteignent $2,2$ à $2,8 \text{ N/m}^2$ pour les vagues longues et $1,6$ à 2 N/m^2 pour les vagues courtes. Le reste de la couche est érodé. Malgré des contraintes τ_w fortes, l'érosion ne progresse pas dans le sédiment, un changement dans la nature texturale du sédiment ou encore de son état de consolidation pouvant expliquer ce phénomène. Cet événement est suivi d'un léger dépôt post-tempête d'environ 3 mm d'épaisseur.

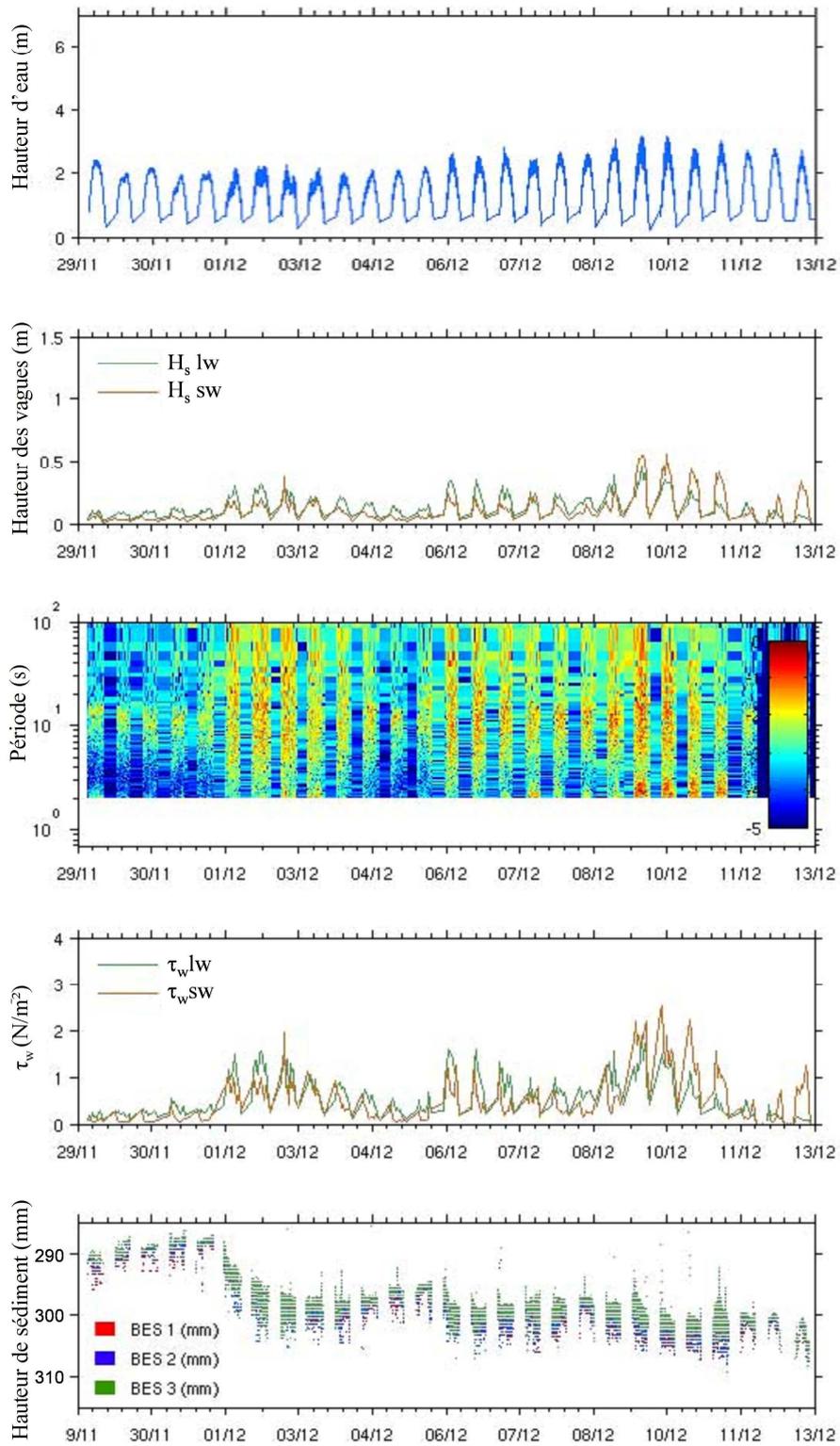


Figure V-10 : Séquences érosives liées à l'activité des vagues sur le site n°2 (Doux haut), entre le 29/11/07 et le 13/12/07

V-2.4. Variations sédimentaires et altimétriques annuelles au droit de chaque station

V- 2.4.1. Caractéristiques sédimentaires

Des différences texturales apparaissent pour chacun des trois sites (tab. V-4 et fig. V-11). En bas de l'estran (Doux bas), les sédiments sont des sables fins, tandis qu'en haut de l'estran, les sédiments s'apparentent à des sables peu vaseux. Les teneurs en eau du sédiment sont très faibles (entre 30-52%), typiques des sédiments sableux émergés. Sur le site de Boyardville, les sédiments sont plus vaseux, avec des teneurs en eau comprises entre 57 et 143 %.

A proximité des bouchots de Boyardville (site n°1), les sédiments sont de composition variable tout au long de l'année. En moyenne, ils correspondent à des sables très vaseux entre 0 et 5 mm de profondeur et à des vases sableuses (type III) en dessous de cette limite. Les seuils d'écoulement (τ_y) sont plus faibles en surface (25 – 100 Pa) qu'en profondeur (47 – 226 Pa) et présentent une grande variabilité au cours de l'année.

Aux Doux haut (site n°2), cette variabilité est très marquée sur les cinq premiers millimètres de l'interface. En période hivernale, les teneurs en silts et argiles sont très faibles (respectivement 10 % et 2 %) et les sédiments sont des sables peu vaseux. En été, les teneurs en silts et argiles de l'interface augmentent pour atteindre un maximum de 7% d'argiles et 52 % de silts à la fin du mois d'août, correspondant à des vases sableuses (type III) avec un pouvoir cohésif significatif.

Sur le bas de l'estran (site n°3), la teneur en sable peut atteindre 98% en hiver. En période estivale, une augmentation discontinue de la fraction fine a lieu, essentiellement dans les premiers millimètres de l'interface, tandis qu'en profondeur, cette tendance est moins marquée.

		Niveau 0-5 mm						Niveau 5-10 mm						Niveau 10-20 mm					
		ty	W	concentration	argile	silt	sable	ty	W	concentration	argile	silt	sable	ty	W	concentration	argile	silt	sable
		(N/m²)	(%)	(g/l)	(%)	(%)	(%)	(N/m²)	(%)	(g/l)	(%)	(%)	(%)	(N/m²)	(%)	(g/l)	(%)	(%)	(%)
Point n°1 (Boyardville)	avr-07	25	100	726	7	52	40	47	65	973	6	34	60	78	80	849	9	51	40
	juil-07	68	92	771	7	52	40	82	104	706	7	44	50	112	96	748	11	69	19
	août-07	-	72	911	4	27	70	106	96	748	10	70	19	156	106	696	11	72	17
	oct-07	145	94	759	5	39	55	161	103	711	10	76	14	226	70	928	7	46	47
	nov-07	103	122	626	8	55	36	128	106	696	10	56	34	190	84	821	9	50	41
	janv-08	-	70	928	5	29	66	59	90	783	7	43	51	62	100	726	9	49	42
	févr-08	32	143	553	8	61	31	50	88	795	7	38	55	56	03	765	7	38	55
	avr-08	91	72	911	7	36	57	181	84	821	7	36	57	212	88	795	6	35	58
Point n°2 (Doux haut)	avr-07	-	52	1114	1	9	90	-	49	1153	2	9	89	-	37	1338	2	13	85
	juin-07	-	42	1254	3	23	74	-	39	1303	5	26	69	-	40	1206	6	32	61
	août-07	101	57	1056	7	52	40	-	51	1127	3	21	76	-	45	1209	4	22	75
	nov-07	-	56	1067	3	23	74	-	44	1223	3	22	74	-	51	1127	6	36	59
	févr-08	-	39	1303	2	11	87	-	39	1303	2	8	90	-	38	1320	2	8	90
	avr-08	-	37	1338	2	9	89	-	39	1303	3	17	80	-	46	1194	6	29	65
Point n°3 (Doux bas)	avr-07	-	27	1545	1	2	98	-	28	1521	1	3	97	-	27	1545	2	7	92
	juin-07	-	47	1180	2	13	85	-	39	1303	1	6	93	-	51	1127	3	16	81
	août-07	-	36	1356	1	7	92	-	36	1356	1	8	91	-	31	1455	1	4	95
	sept-07	-	49	1153	4	22	74	-	41	1270	2	14	84	-	36	1356	2	11	87
	oct-07	-	46	1194	2	12	86	-	40	1286	2	11	88	-	39	1303	3	16	81
	nov-07	-	50	1140	3	19	78	-	43	1239	2	13	84	-	34	1304	3	12	85
	janv-08	-	35	1375	1	4	95	-	35	1375	1	3	96	-	31	1455	1	3	96
	févr-08	-	36	1356	2	12	87	-	33	1414	2	10	88	-	33	1414	2	8	91
	avr-08	-	35	1375	2	10	88	-	34	1394	2	8	90	-	32	1434	1	4	95

Tableau V-4 : Récapitulatif des paramètres texturaux (% de fractions sableuse, silteuse et argileuse) et comportementaux (seuil d'écoulement, teneur en eau pondérale et concentration massique) des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) sur les sites de Boyardville (n°1) et des Doux (n°2 et n°3), entre avril 2007 et avril 2008

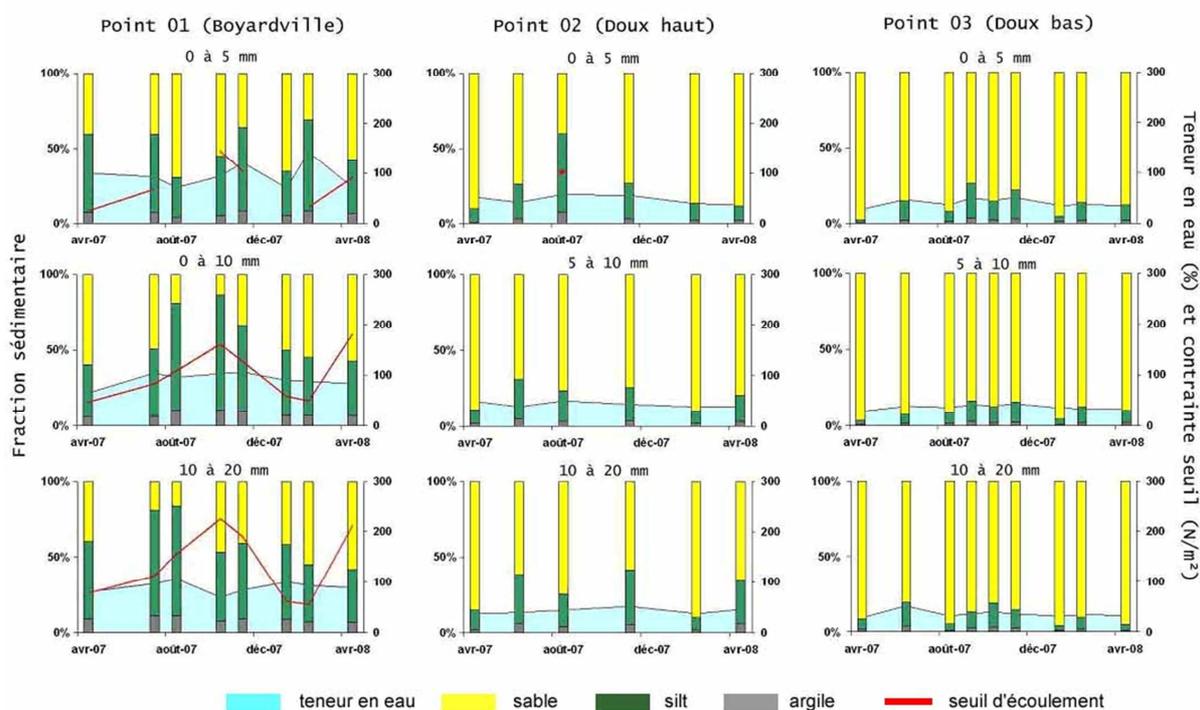


Figure V-11 : Variations des paramètres texturaux et comportementaux des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) sur les sites de Boyardville (n°1), et des Doux (n°2 et n°3), entre avril 2007 et avril 2008

V-2.4.2. Variations de la hauteur de l'interface

L'observation des variations altimétriques entre le 04/04/07 et le 08/04/08 sur l'Ouest de la baie, montre une dynamique sédimentaire différente entre le haut et le bas de l'estran (fig. V-12).

NB : Les variations altimétriques de l'interface du site de Boyardville ne seront pas présentées, ni discutées, du fait de la non-représentativité de cette zone particulière eu égard à l'ensemble du site.

Le bas de l'estran ne montre pas de sédimentation saisonnière, seules des variations pluri-centimétriques de l'interface sédimentaire sont observées en relation avec l'activité des vagues et dans une moindre proportion des courants de marée. Lors des coups de vents, il se produit très rapidement une érosion ou un dépôt de 20 à 30 mm. L'interface sédimentaire semble fluctuer au-dessus d'un « niveau d'équilibre », à partir duquel les fronts d'érosions progressent difficilement. Sur l'année d'étude, ce site est en légère érosion (- 30 mm), et apparaît comme une zone de transit sableux.

Le haut de l'estran (site n°2) montre une évolution saisonnière (fig. V-12) :

- La première situation apparaît en été et perdure jusqu'à la fin de l'automne. C'est une période calme d'un point de vue hydrodynamique, où les herbiers à zostères présentent la biomasse la plus forte (Borum *et al.*, 2004; Dalloyau, 2008; Larkum *et al.*, 2007). Ces herbiers induisent une augmentation du coefficient de frottement sur le fond (Gacia *et al.*, 1999), provoquant des changements de composition des sédiments de surface, et entraînent un exhaussement temporaire (+ 20 mm, entre le 24/06/07 et le 12/11/07).
- La deuxième situation s'étend du mois de décembre au mois de juin. Au début de l'hiver, les herbiers perdent environ 48% de leur biomasse (Dalloyau, 2008) comme l'illustrent les photos de la figure V-14, et ne jouent plus leur rôle de frein hydrodynamique. L'interface de type « sable peu vaseux » réagit bien aux sollicitations des vagues de tempêtes, conduisant à un transport sédimentaire fort durant cette période. Une estimation de quantité de sédiment remobilisé l'hiver, portant sur le premier centimètre (considéré comme seul affecté par cette remobilisation), peut être faite. En prenant comme hypothèse une concentration moyenne de 1200 g/L pour ces sédiments, et compte-tenu que la superficie des herbiers est de l'ordre de 8,6 km², environ 165 000 tonnes de sédiments seraient ainsi érodés sur cette zone au cours de l'hiver observé. Cette partie de l'estran semble constituer une zone de stockage temporaire de sédiments fins.

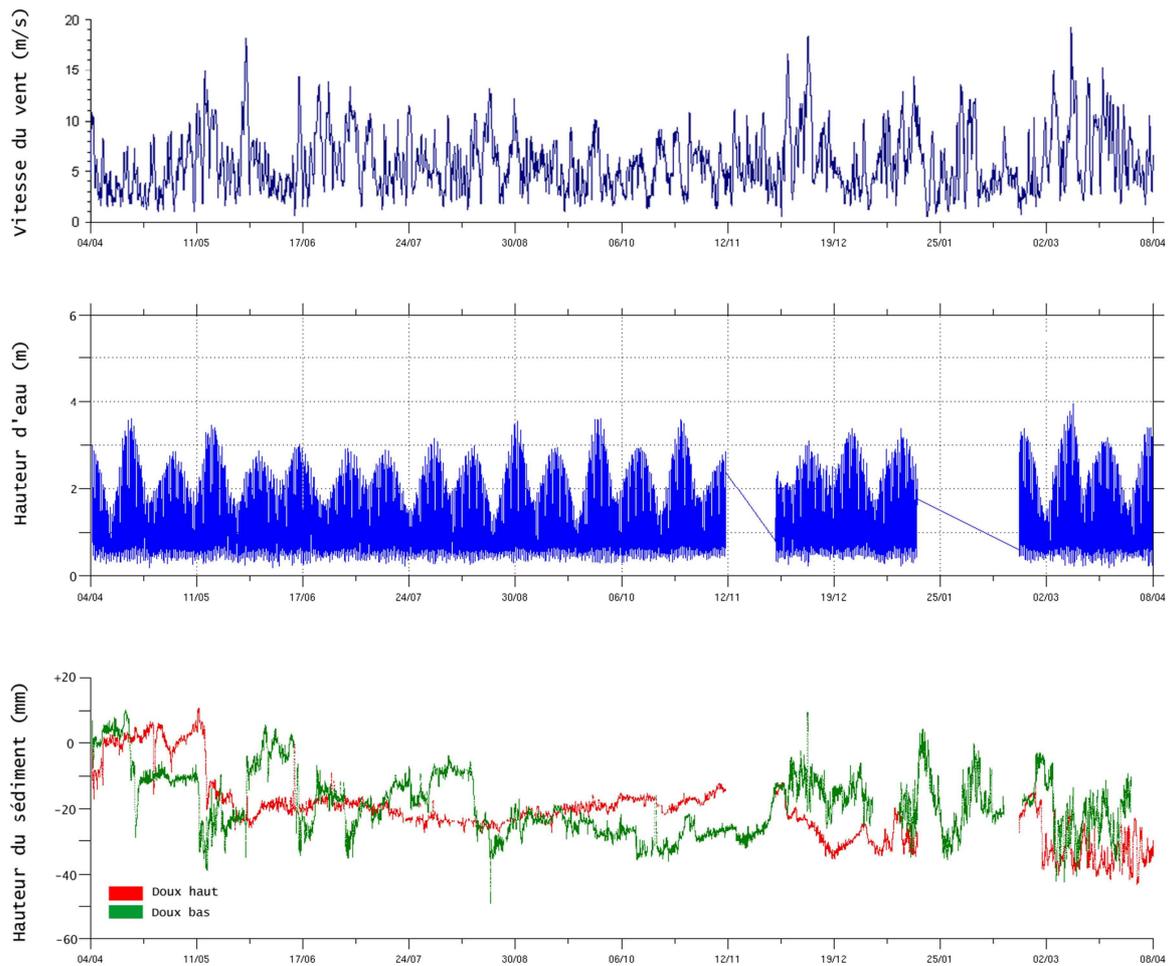


Figure V-12 : Variations de la hauteur des sédiments, entre le 04/04/07 et le 08/04/08 sur le haut et sur le bas de l'estran (site n°2 et n°3) de la partie Ouest de la baie, en fonction de la hauteur d'eau mesurée et de la vitesse moyenne du vent enregistrée au phare de Chassiron

L'analyse en imagerie RX de la carotte prélevée sur le site montre une certaine homogénéité granulométrique (fig. V-13) avec des sédiments sableux. Des rhizomes sont observés dans les 10 premiers centimètres de l'interface. En revanche, aucun litage sédimentaire particulier n'est visible, ce qui confirme que les dépôts fins estivaux ne sont pas conservés.

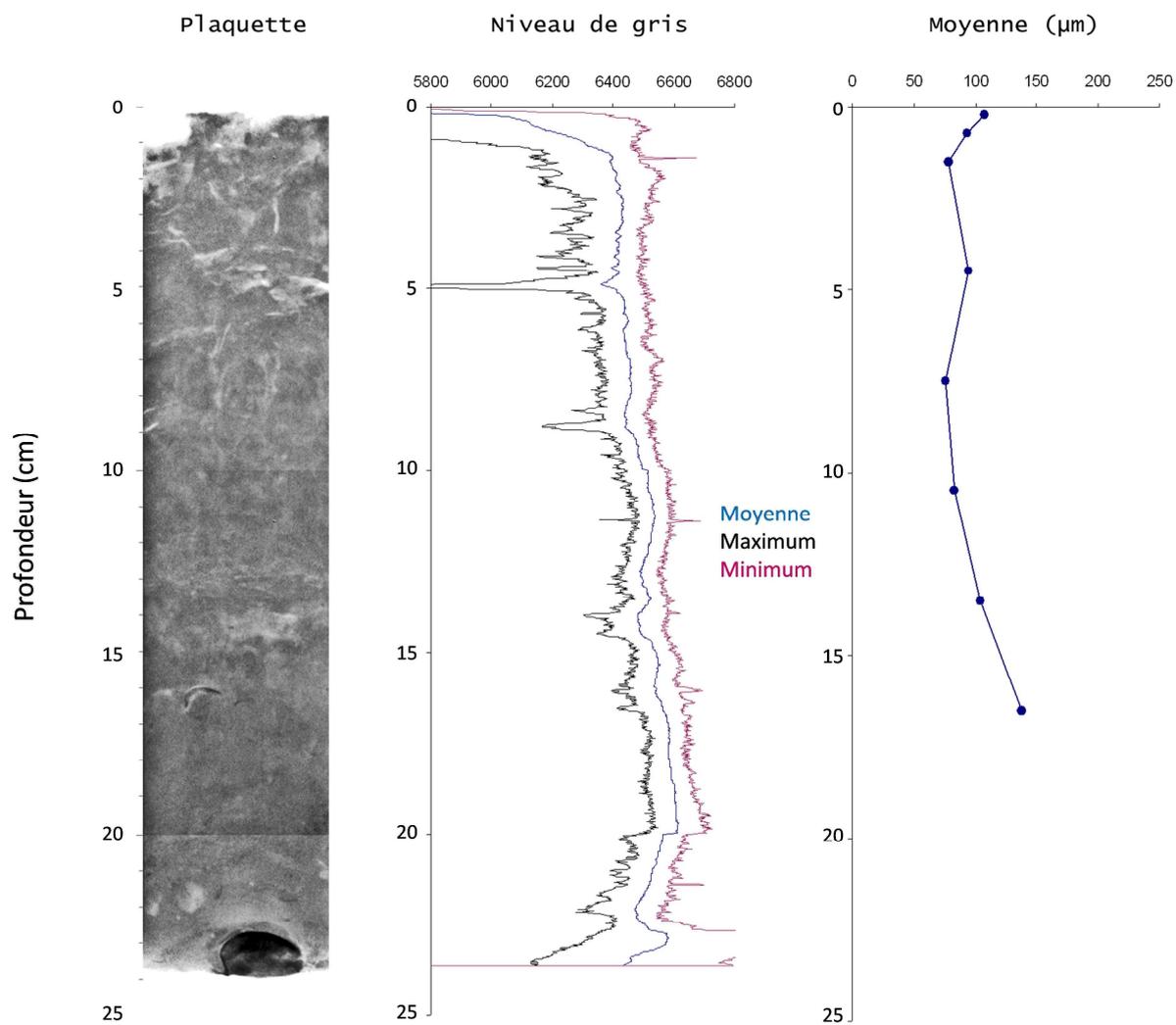


Figure V-13 : Résultats en radiographie au rayon X (SCOPIX) : niveaux de gris et taille moyenne des particules sur le site des Doux haut (n°2). Date : 08/04/08



*Figure V-14 : Evolution de la densité des herbiers sur la zone des Doux haut (site n°2).
(Photos : S.Kervella)*

V-3. Vasière de Monportail-Brouage

Les sites retenus sur la vasière de Monportail-Brouage sont positionnés sur la figure suivante :

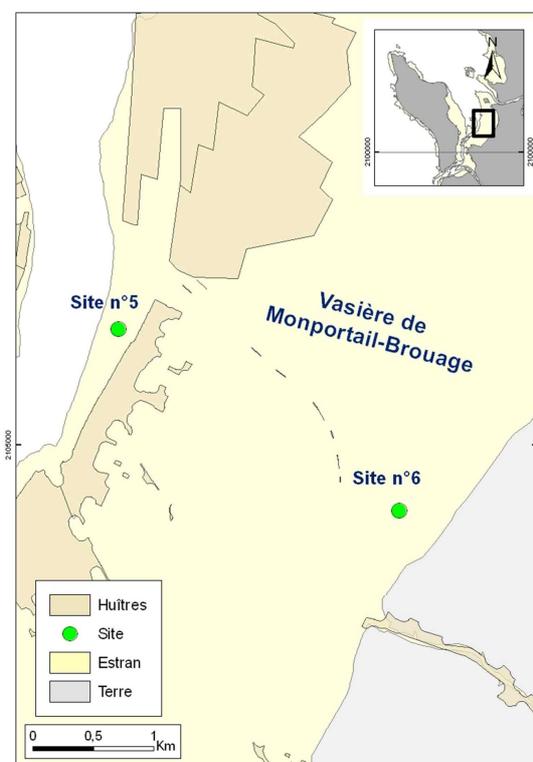


Figure V-15 : Position des sites de mesures hydrosédimentaires sur la vasière de Monportail-Brouage

V-3.1. Description des vagues

NB : Concernant le calcul des contraintes τ_w , une longueur de rugosité (z_0) de 0,2 mm a été choisie, qui correspond à un sédiment vaseux selon Soulsby, ceci conformément à l'analyse texturale des sédiments prélevés sur cette vasière.

V-3.1.1. Caractéristiques annuelles

Durant les 12 mois d'enregistrement (fig. V-16), les vagues ne sont pas significatives ($H_s < 0,20\text{m}$) pendant 90% du temps durant lequel la vasière est immergée (respectivement 86% sur le bas et 94% sur le haut de la vasière). En revanche, pendant environ 2% du temps (4% sur le haut et 2% sur le bas) les vagues dépassent 0,40 m.

Les vagues longues ($T_r > 11$ s) représentent 45 % des vagues sur le haut de la vasière, contre 13 % seulement sur sa partie basse. A l'inverse, les vagues d'une période inférieure à 5 s représentent 24 % en haut contre 44 % sur le bas de l'estran.

Les contraintes de frottement des vagues sur le fond (τ_w) calculées ont sensiblement les mêmes valeurs en haut et en bas de la vasière et restent très faibles ($\tau_w < 0,3 \text{ N/m}^2$) 89 % du temps d'enregistrement. En revanche, les contraintes τ_w supérieures à 1 N/m^2 ne représentent que 1 à 3 % du temps d'immersion.

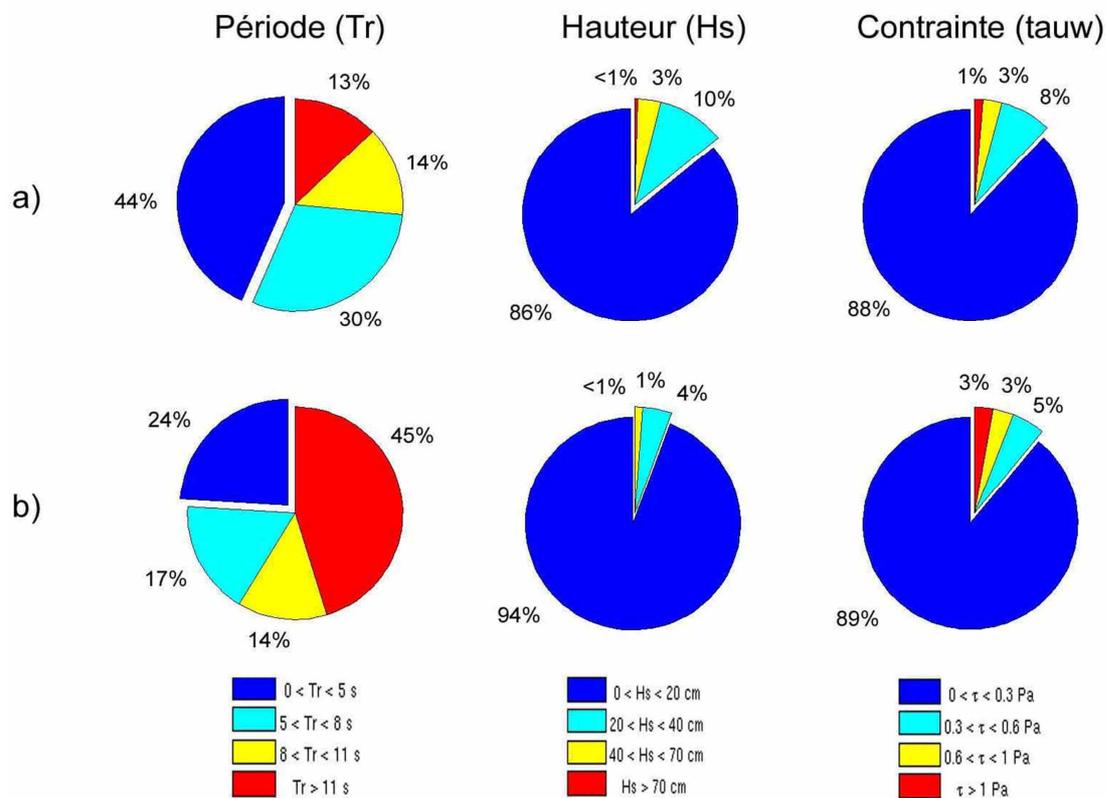


Figure V-16 : Caractéristiques des vagues (H_s , T_r et τ_w) (a) pour la période du 14/06/07 au 01/02/08 sur le site n°5 et (b) entre le 05/04/07 et le 09/04/08 sur le site n°6

Lors de coups de vents forts ($U_{\text{vent}} > 16 \text{ m/s}$), les vagues peuvent atteindre une hauteur de 0,7 m sur le haut de la vasière et de 1,2 m sur la partie basse, générant des contraintes sur le fond supérieures à 2 N/m^2 (fig. V-17).

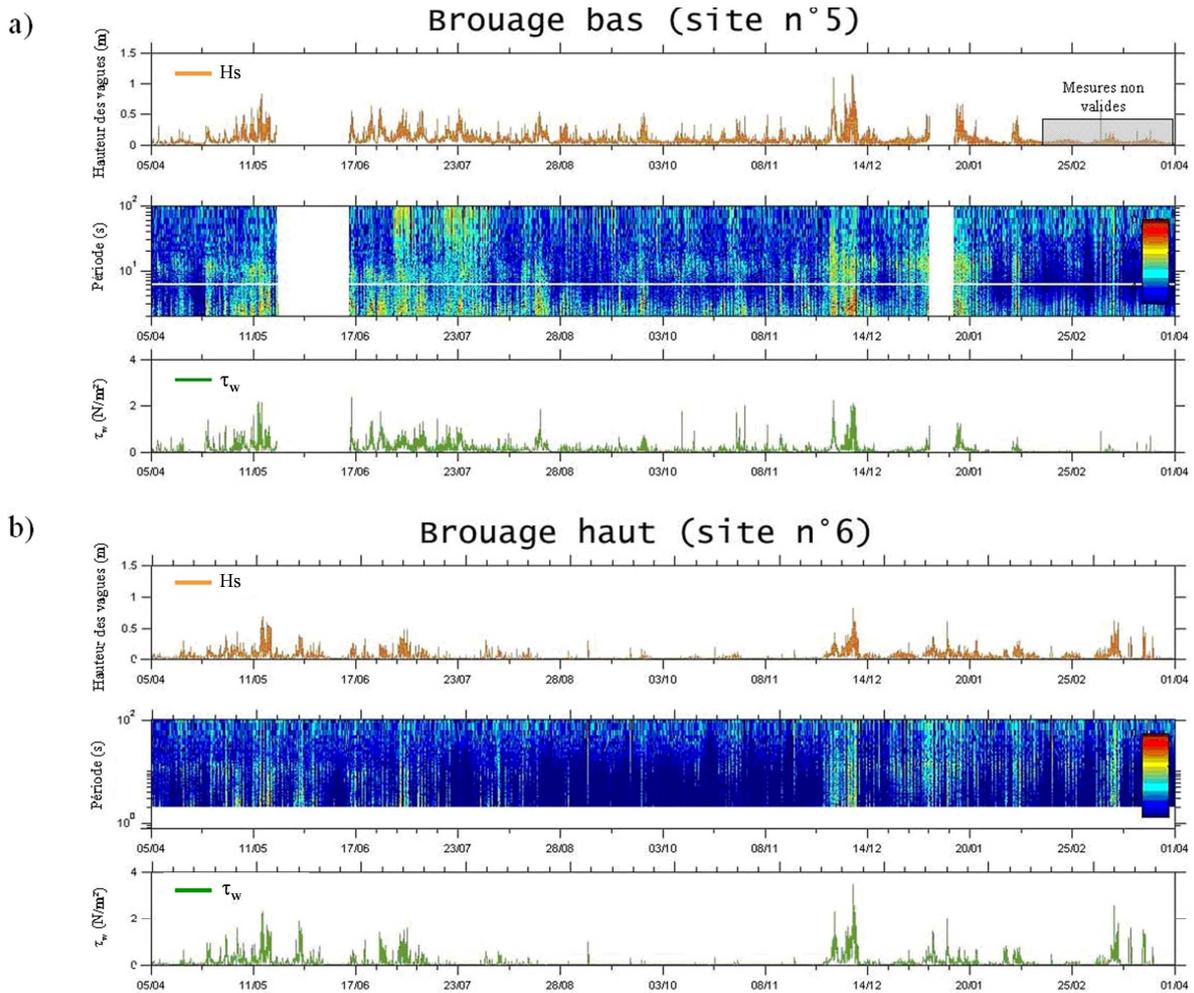


Figure V-17 : Enregistrement en continu des paramètres physiques des vagues (H_s , T_r et τ_w) (a) sur le bas et (b) sur le haut de la vasière

V-3.1.2. Caractéristiques bimensuelles

L'analyse bimensuelle des données de vagues (fig. V-18) montre une saisonnalité bien marquée, ce qui est également observable sur les enregistrements en continu (fig. V-17). Les périodes au cours desquelles les vagues d'une hauteur supérieure à 0,40 m sont les plus fréquentes (avril à juillet 2007 et décembre 2007 à mars 2008) correspondent également aux périodes de vents forts. Ces vagues provoquent alors des contraintes τ_w supérieures à 0,6 N.m⁻², pendant près de 8% du temps en bas d'estran, et de 10% en haut d'estran,.

L'influence de la direction des vents sur la propagation des vagues est très nette au mois d'octobre et novembre 2007. Au cours de cette période, les vents ont été à plus de 60% du temps de secteur Nord et Est, générant des vagues pouvant se développer sur la partie haute de la vasière. Ainsi des différences significatives sur les périodes et les hauteurs des vagues sont observées entre la partie haute et la partie basse de l'estran.

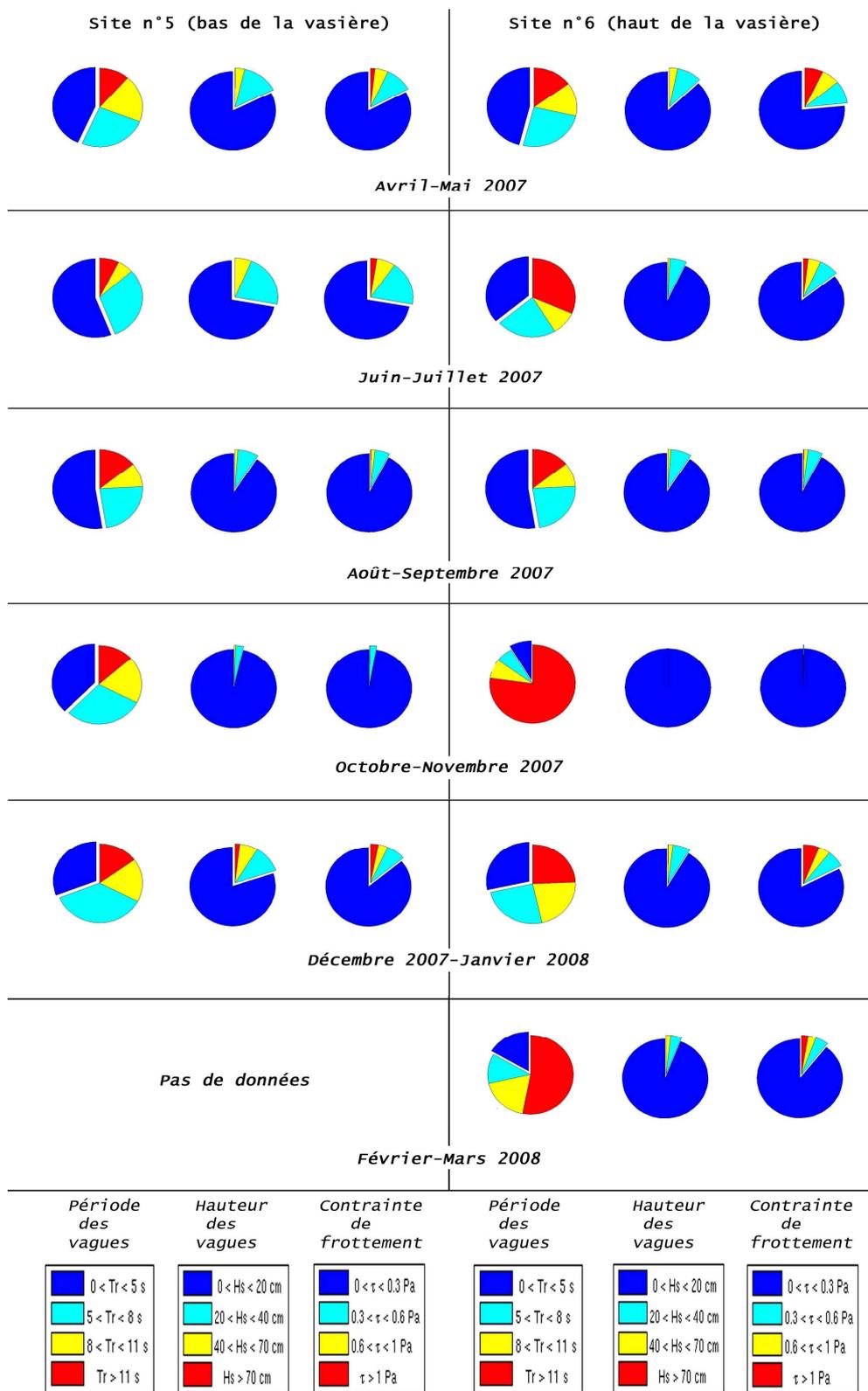


Figure V-18 : Caractéristiques bimensuelles des vagues (H_s , T_r et τ_w) entre avril 2007 et mars 2008 sur le bas (site n°5) et le haut de la vasière (site n°6)

V-3.1.3. Limitation de la hauteur des vagues

L'analyse des hauteurs des vagues (H_s) mesurées sur la vasière de Brouage, pendant les 12 mois d'enregistrement effectué, met en évidence la relation linéaire qui relie H_s avec la hauteur d'eau (fig. V-19).

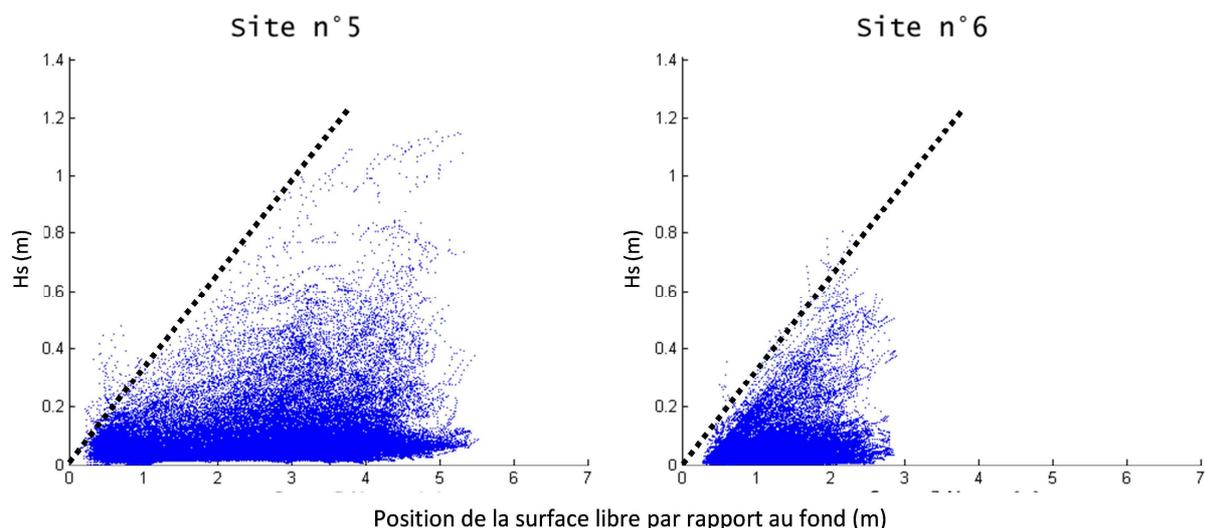


Figure V-19 : Détermination de la droite enveloppe (en pointillé) caractérisant la relation linéaire du type $H_s = \beta h$ obtenue à partir des données provenant du site n°5 (Brouage bas) et du site n°6 (Brouage haut), entre le mois d'avril 2007 et le mois d'avril 2008

Sur les deux sites, quelle qu'en soit leur profondeur, la hauteur maximale significative des vagues ne dépasse pas 33 % de l'épaisseur de la tranche d'eau. Cette valeur indique que la hauteur des vagues sur la vasière peut rester limitée dans une proportion empêchant ainsi le déferlement. Les hauteurs H_{\max} calculées atteignent 1,2 m en bas de l'estran, et 1 m en haut de la vasière.

L'analyse topographique des sites d'études, réalisée à l'aide d'isobathes, indique que la pente (β) est plus élevée sur le bas de l'estran (site n°5) que sur sa partie haute de l'estran (site n°6) (tab. IV-5). La valeur du paramètre de frottement (f_w) en bas de l'estran est ainsi de 0,21, alors que celle en haut de l'estran est 10 fois plus faible (0,028).

Site	H_s/h	β	f_w	h_{\max} (m)	H_{\max} (m)
n°5	0,33	0,0060	0,210	5,5	1,8
n°6	0,33	0,0008	0,028	3,0	1,0

Tableau V-5 : Rapport H_s/h , valeur de la pente (β), paramètre de frottement (f_w), hauteur d'eau maximale (h_{\max}) et hauteur significative maximale des vagues (H_{\max}) calculées sur les sites n°5 et n°6

V-3.2. Processus sédimentaires à l'échelle semi-diurne

Les mesures correspondent à des enregistrements réalisés en l'absence de vagues, au cours d'une marée de ME (coeff. 31-38) et au cours d'une marée de VE (coeff. 107-112). Les périodes d'observation retenues pour les deux sites sont différentes, du fait de la difficulté d'obtenir dans un environnement naturel des données de bonne qualité. Ainsi, les caractéristiques des courants (à 15 cm du fond), et de turbidité, n'ont pu être enregistrées que sur le bas de la vasière.

V-3.2.1. En bas de la vasière

Sur la partie basse de la vasière de Monportail-Brouage (site n°5), les vitesses des courants (tab. V-6) en flot sont, systématiquement, deux fois plus fortes qu'en période de jusant. Les contraintes τ_c estimées atteignent 0,20 N/m² pendant le flot d'une morte-eau, tandis qu'elles sont de l'ordre de 0,70 N/m², pendant le flot d'une vive-eau.

ME/VE	Vitesse max (m/s)		Tau c max (N/m ²)		Turbidité max (mg/l)
	Flot	Jusant	Flot	Jusant	
ME	0,20	0,12	0,20	0,10	50-80
VE	0,50	0,30	0,90	0,90	500

Tableau V-6 : Caractéristiques des courants de marée maximum et de la turbidité sur le bas de la vasière de Monportail-brouage (site n°5), en période de mortes-eaux (ME) et en vives-eaux (VE), en période calme

Néanmoins, des contraintes τ_c de l'ordre de 0,2 N/m² sont suffisantes pour éroder des sédiments vaseux de type V, très fluides (concentration estimée entre 150 et 400 g/l). En dessous de cette valeur, les particules en suspension se déposent sur le fond et provoquent un dépôt en fin de jusant. En mortes-eaux (fig. V-20), ce dépôt est d'environ 2 à 4 mm d'épaisseur, tandis qu'en vives-eaux (fig. V-20) il est d'environ 4 mm.

Cependant, les turbidités observées sont 10 fois plus fortes en début de flot et fin de jusant de vives-eaux, plutôt qu'en mortes-eaux, indiquant une remise en suspension de sédiment importante. Il est probable que l'ALTUS n'enregistre ni les érosions, ni les dépôts, qui peuvent avoir lieu au tout début du recouvrement par la marée de vives-eaux, sur le site étudié (site n°5).

Les flux d'érosion pour chaque situation ont été calculés en considérant un sédiment vaseux immergé, d'une concentration de 200 g/l (sédiment de type mollin). Dans le premier exemple (fig V-8), en mortes-eaux, trois séquences de dépôts/érosions aux étales de marée basse sont visibles. Les contraintes τ_c provoqueraient des flux d'érosion faibles compris entre 0,016 et 0,08 g.m⁻².s⁻¹. En période de vives-eaux (fig V-21), les contraintes τ_c , en début de flot, sont plus fortes (> 0,7 N/m²), les flux d'érosion associés à ces contraintes de frottement étant alors compris entre 0,11 et 0,16 g.m⁻².s⁻¹.

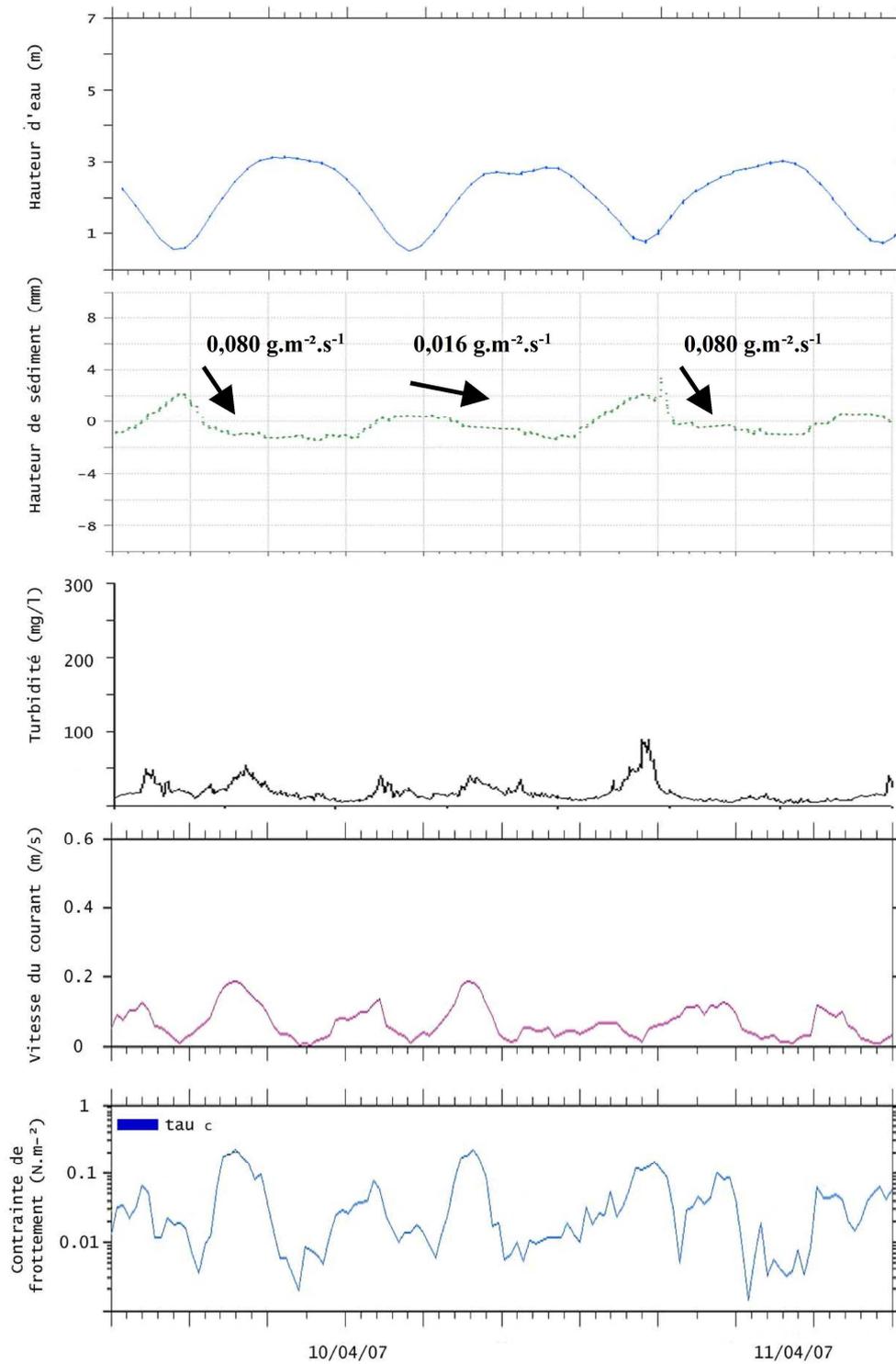


Figure V-20 : Variations des paramètres hydrodynamiques (hauteur d'eau, vitesse du courant et contrainte du courant sur le fond) et sédimentaires (turbidité et hauteur du sédiment) pendant une période de mortes-eaux (ME) sur le bas de la vasière de Monportail-Brouage (site n°5) : (a) hauteur d'eau, (b) hauteur du sédiment, (c) turbidité, (d) vitesse du courant et (e) contrainte de frottement du courant

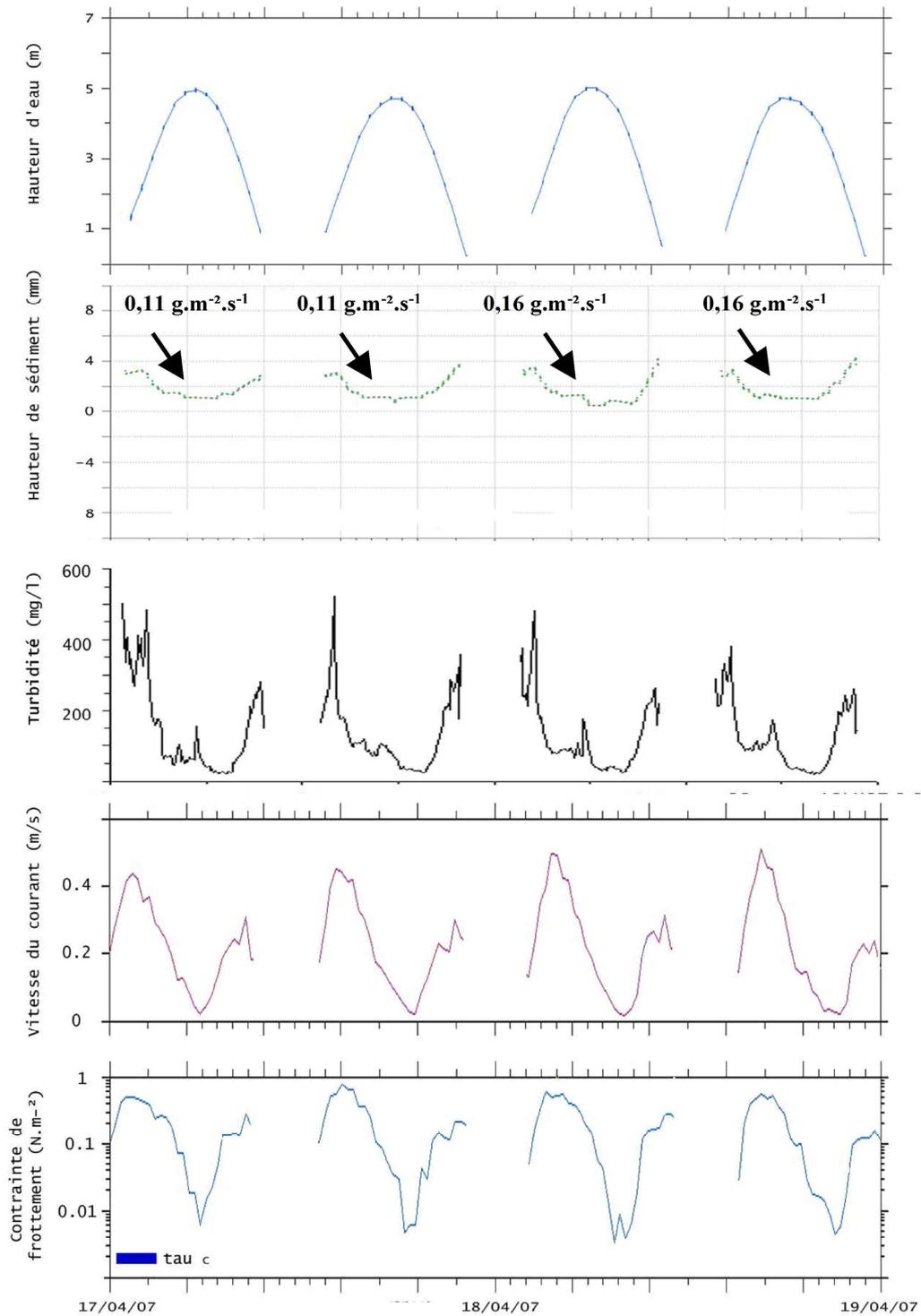


Figure V-21 : Variations des paramètres hydrodynamiques (hauteur d'eau, vitesse du courant et contrainte du courant sur le fond) et sédimentaires (turbidité et hauteur du sédiment) pendant une période de vives-eaux (VE), sur le bas de la vasière de Monportail-Brouage (site n°5) : (a) hauteur d'eau, (b) hauteur du sédiment, (c) turbidité, (d) vitesse du courant et (e) contrainte de frottement du courant

V-3.2.2. En haut de la vasière

Compte-tenu de problèmes techniques ayant contrarié l'acquisition de données altimétriques sur le haut de la vasière de Monportail-Brouage (site n°6) en période de mortes-eaux, ces données ne seront pas commentées. En revanche, une période calme correspondant à une période de vives-eaux a pu être étudiée (fig. V-22).

Contrairement à ce qui se passe sur la partie basse de la vasière, un dépôt d'environ 2 à 3 mm se produit à l'étale de marée haute, tandis qu'aucun dépôt n'est observé à l'étale de marée basse du fait du découvrement systématique de cette zone. Lorsque les courants reprennent au début du jusant, ces dépôts sont érodés. En prenant comme hypothèse que ces dépôts sont constitués d'une vase d'une concentration de 200 g/l, les flux d'érosion calculés sont estimés entre $0,028$ et $0,056 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

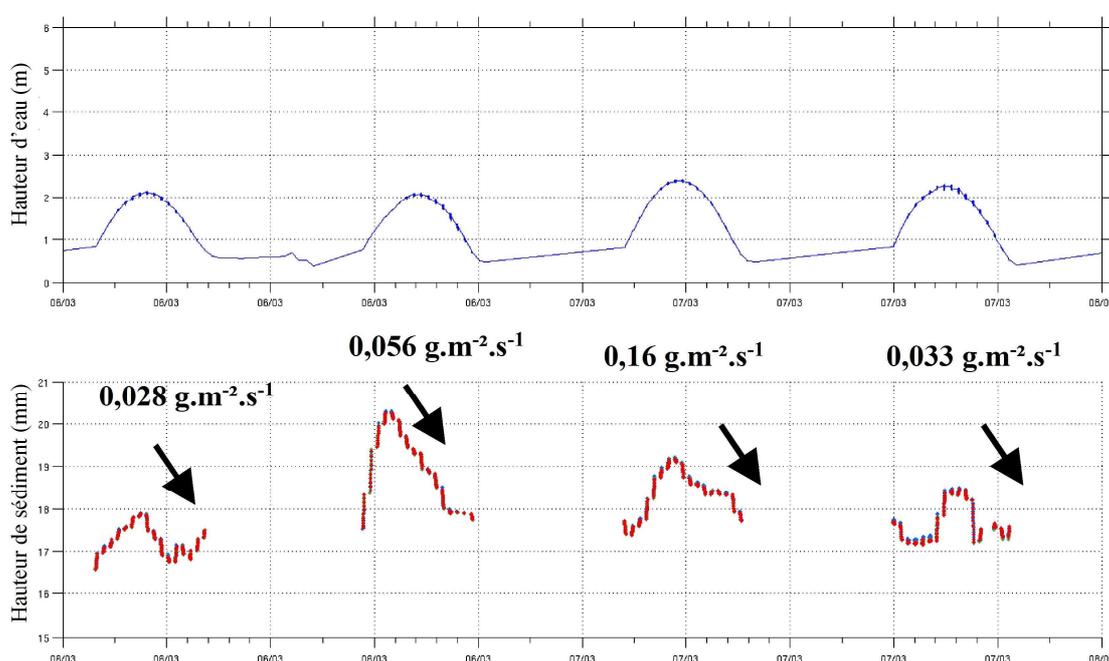


Figure V-22 : Variations de la hauteur du sédiment pendant une période de vives-eaux (VE) sur le haut de la vasière de Monportail-Brouage (site n°6)

V-3.3. Impact des vagues sur la stabilité des sédiments

Les vagues supérieures à 0,40 m sont peu fréquentes sur la vasière. Cependant, lorsque ce cas de figure se présente, elles peuvent provoquer des contraintes τ_w supérieures à 1 N/m^2 . Les conséquences de ces forçages sur la stabilité des sédiments en haut et en bas de la vasière, lors de périodes de tempêtes. (Vents d'ouest à Sud-Ouest, avec des vitesses moyennes supérieures à 18 m.s^{-1}).

Le premier exemple correspond à une période ventée, entre le 29/11/07 et le 14/12/07 (fig. V-23). Une seule série d'enregistrement sera présentée, correspondant au site n°5, puisqu'il n'a pas été possible techniquement de déterminer l'interface sédimentaire sur le site n°6.

Le second exemple (fig. V-24) couvre une période, comprise entre le 01/03/08 et le 01/04/08, cette fois pour le seul site n°6, les enregistrements des hauteurs de sédiment et des vagues réalisés sur le site n°5 n'ayant pas été utilisés, en raison de l'encrassement du capteur de pression.

V-3.3.1 En bas de la vasière

Entre le 29/11/07 et le 14/12/07, deux fortes tempêtes affectent la zone d'étude. La première a lieu le 02/12/07 et la seconde le 09/12/07 (fig. V-23).

La couche sédimentaire de surface (0-1 cm) du site n°5 est caractérisée, deux jours avant la première tempête (le 27/11/07), comme étant une vase fluide de type V, d'une teneur en eau de 184% (concentration de 451 g/l) et présentant un seuil d'écoulement de 27 Pa. Cette tempête génère des vagues d'une hauteur maximale de 1,1 m et des contraintes τ_w supérieures à 2 N/m², avec une contribution des vagues longues (τ_{lw}) quasiment nulle ($\tau_{lw} < 0,3$ N/m²). Cet événement dure moins d'une journée, les contraintes maximales s'étant développées au cours de la deuxième marée. L'ensemble du dépôt de vase fluide est érodé et remis en suspension sous l'unique action des vagues courtes. L'érosion s'arrête dès que les contraintes τ_w deviennent inférieures à 0,5 N/m².

Entre les deux tempêtes, une période de calme « relatif » s'installe, avec toutefois des vagues de 0,3 à 0,8 m de haut qui affectent encore la zone. Cette période dure environ 5 jours.

Au début de la seconde tempête, les vagues atteignent rapidement une hauteur maximale de 1,3 m et les contraintes τ_w dépassent 2 N/m² jusqu'à atteindre un maximum de 2,6 N/m². L'interface sédimentaire, correspondant à des vases moins fluides ($c = 488$ g/l, $\tau_y = 53$ Pa), est érodée sur une épaisseur d'environ 40 mm en 5 marées. Au cours des étales de marée haute, des dépôts de 8 mm se produisent. Puis, en fin de jusant, une érosion de 15 mm affecte de nouveau l'interface. Il y a donc une érosion en « dent de scie », cette série d'érosions s'achèvant lorsque le front d'érosion atteint une interface sédimentaire plus dure à éroder, avec une concentration de 556 g/l, et un seuil d'écoulement de 90 Pa.

Ainsi, il apparaît que les sédiments superficiels de cette partie de la baie présentent des états de consolidation différents sur de faibles épaisseurs, rendant plus difficile leur érosion sous de faibles contraintes de frottement des vagues sur le fond.

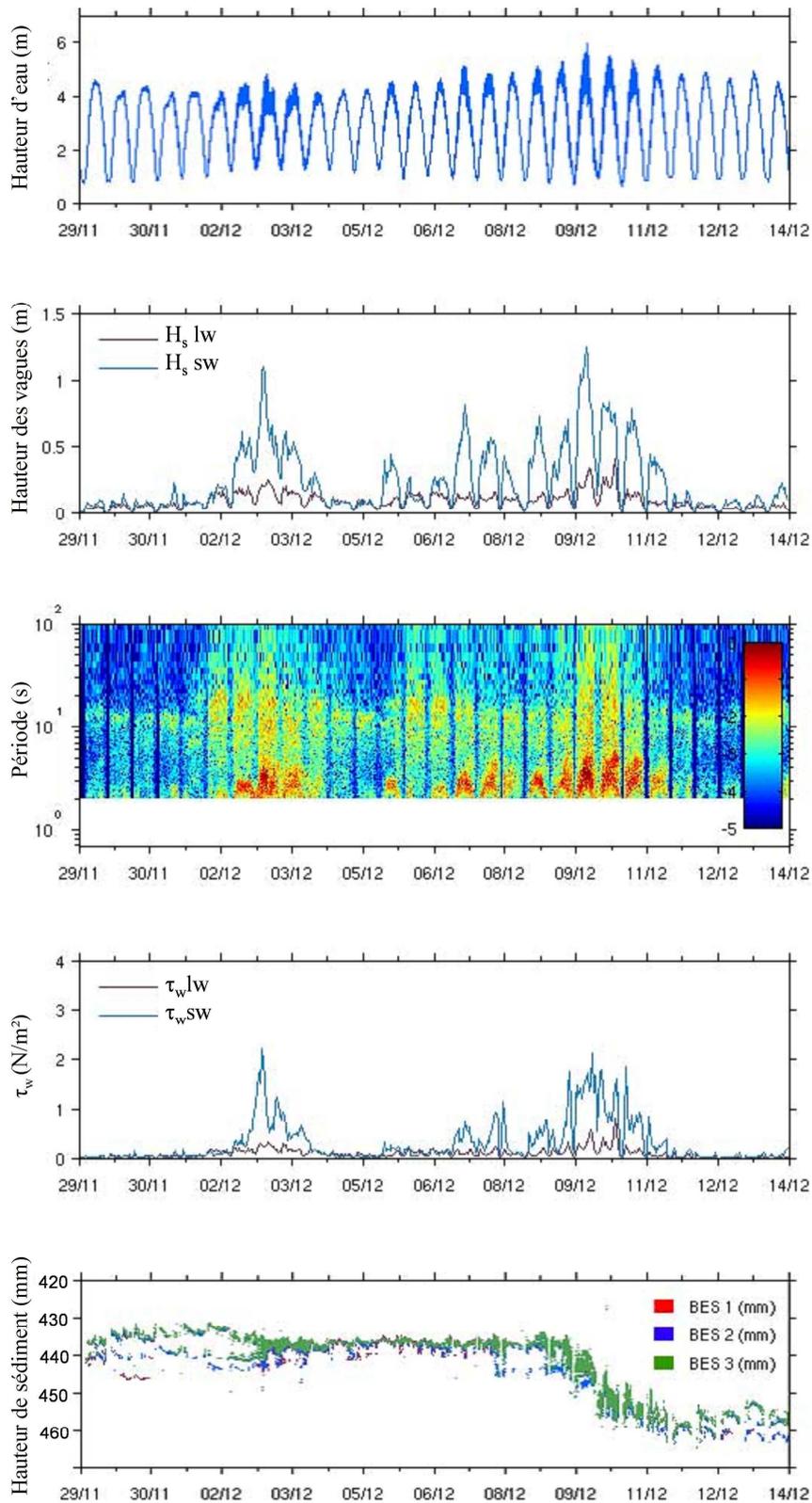


Figure V-23 : Séquences érosives sur la partie basse de la vasière de Monportail-Brouage (site n°5), liées à l'activité des vagues entre le 29/11/07 et le 14/12/07

V-3.3.2 En haut de la vasière

Entre le 01/03/08 et le 01/04/08 (fig. V-24), une forte tempête a affecté cette partie de la vasière (site n°6). Cet événement a été suivi, plusieurs jours plus tard, par deux coups de vents moins forts, mais tout aussi significatifs quant à leurs conséquences sur la stabilité de l'interface.

Le sédiment de surface, au moment de l'événement, est probablement une vase de type V, bien que ses caractéristiques texturales et comportementales ne soient pas connues précisément. Néanmoins, divers prélèvements réalisés sur ce site, avant et après cet événement, indiquent que l'interface correspond à de la vase très fluide (mollin).

La tempête du 10/03/08 se produit en période de vives-eaux, les vents, violents, provoquant des vagues d'une hauteur maximale d'environ 70 cm. Les contraintes au fond sont liées essentiellement aux vagues courtes ($T_r < 6$ s), avec des valeurs atteignant rapidement $\tau_w = 2,2$ N/m² (à marée haute) conduisant à l'érosion de 25 mm d'épaisseur de sédiments en 4 marées. Lors de la première marée, les contraintes sont maximales ($\tau_w = 2,2$ N/m²) et provoquent une érosion de 15 mm. Au cours des trois marées suivantes, le front d'érosion semble avoir du mal à progresser, malgré des contraintes τ_w supérieures à 1 N/m². A la suite de cet événement, lorsque les contraintes τ_w sont quasiment nulles, un dépôt de moins de 10 mm a lieu.

Six jours après la première tempête, un coup de vent engendre des vagues de 0,3 m de hauteur maximale, en période de mortes-eaux et pendant 3 marées. Compte-tenu de la très faible tranche d'eau au moment où ces vagues affectent la zone, les contraintes de frottement des vagues sont quasiment nulles et atteignent des valeurs significatives d'environ 1 N/m². Dès la première marée, seule une épaisseur de 18 mm de sédiment est érodée, le front d'érosion ne se propageant plus beaucoup au cours des deux marées suivantes. Une période de « calme » fait suite à cet événement sans dépôt apparent.

Ensuite un second coup de vent se produit, avec des vagues de 0,5 m de hauteur. Elles engendrent, en période de vives-eaux, des contraintes au fond légèrement supérieures à 1 N/m². Le sédiment de surface, qui n'avait pas été affecté par l'épisode de vagues précédent, subit une érosion d'environ 15 mm au cours de 2 marées.

Il apparaît que les sédiments superficiels de la partie haute de la vasière constituent une interface fluide sur une épaisseur importante. Les fronts d'érosion peuvent donc se propager très rapidement, alors que les temps d'immersion de l'interface sont plus courts que sur le bas de la vasière.

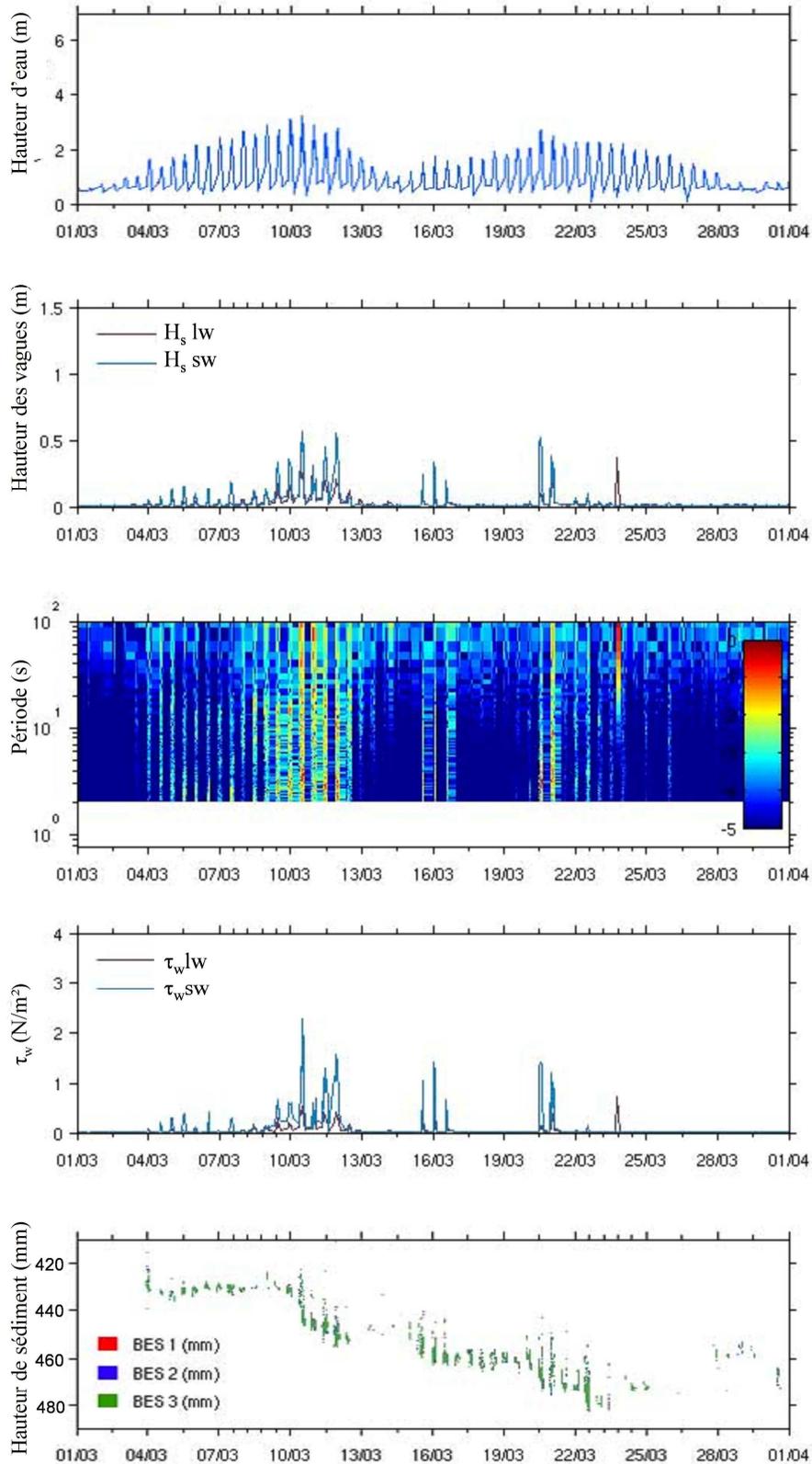


Figure V-24 : Séquences érosives, liées à l'activité des vagues, sur la partie haute de la vasière, entre le 01/03/08 et le 01/04/08

V-3.4. Variations sédimentaires et altimétriques annuelles sur la vasière au droit de chaque station

V-3.4.1. Evolution des caractéristiques sédimentaires

L'analyse mensuelle des caractéristiques sédimentaires des deux premiers centimètres de l'interface de la partie basse et de la partie haute de la vasière montre de faibles variations texturales (tab. V-7 et fig. V-25). Ces sédiments sont constitués d'environ 10% d'argile, 80% de silt, et 10% de sable fin, correspondant à des vases (type V). La fraction sableuse est légèrement plus importante sur la partie basse (11%) que sur la partie haute (9%). L'étude des paramètres rhéologiques indique des différences entre le haut ou le bas de la vasière :

- Le bas de la vasière est constitué d'une vase très concentrée (600-800 g/l) avec un seuil d'écoulement (τ_y) élevé (130-250 Pa) en périodes printanière et estivale : il s'agit d'un sédiment compacté, voire en cours de compaction. A partir du mois de novembre, les sédiments constituant l'interface sont beaucoup plus fluides (mollin). Ils présentent des concentrations comprises entre 350 et 500 g/l et leurs seuils d'écoulements sont compris entre 10 et 80 Pa (maximum observé à 2 cm de profondeur). En général, la teneur en eau et le seuil d'écoulement (τ_y), sont plus importants dans les cinq premiers millimètres que dans les couches inférieures.
- Dans la partie haute de la vasière, les sédiments de surface (0-20 mm) sont toujours fluides (300-600 g/l). Toutefois, quelques variations apparaissent en fonction des saisons. En mai 2007, et en avril 2008, les sédiments superficiels (0-10 mm) sont très fluides, leurs concentrations étant inférieures à 350 g/l et leurs seuils d'écoulement mesurés inférieurs à 20 Pa : il s'agit là encore de mollin. Entre le mois de juillet et le mois de janvier, ces sédiments présentent des concentrations un peu plus fortes (400-500 g/l), leur seuil d'écoulement étant de l'ordre de 40-50 Pa. Cette couche repose sur un sédiment plus concentré (500-600 g/l).

		Niveau 0-5 mm						Niveau 5-10 mm						Niveau 10-20 mm					
		τ_y	W	concentration	argile	silt	sable	τ_y	W	concentration	argile	silt	sable	τ_y	W	concentration	argile	silt	sable
		(N/m ²)	(%)	(g/l)	(%)	(%)	(%)	(N/m ²)	(%)	(g/l)	(%)	(%)	(%)	(N/m ²)	(%)	(g/l)	(%)	(%)	(%)
Bas de la vasière	mai-07	92	150	533	10	82	8	195	127	607	12	81	7	249	110	677	12	81	7
	août-07	129	110	677	14	77	10	141	113	663	15	84	1	138	113	663	14	85	1
	oct-07	115	127	607	12	83	5	176	104	706	10	74	16	234	91	777	15	82	3
	nov-07	27	184	451	8	72	20	53	167	488	11	74	15	90	142	556	10	73	17
	janv-08	13	241	359	10	79	11	39	196	428	10	75	15	47	184	451	11	76	13
	févr-08	36	201	419	11	80	9	36	180	459	11	80	9	80	153	524	11	72	17
	avr-08	17	202	417	9	77	13	26	213	399	10	83	7	61	147	541	10	73	17
Haut de la vasière	mai-07	14	290	305	10	84	6	18	276	319	9	81	10	70	235	367	11	80	9
	juil-07	34	179	461	11	75	15	29	179	461	11	79	10	46	177	466	11	72	17
	nov-07	49	230	374	10	90	1	85	168	486	13	87	0	186	130	596	10	89	1
	janv-08	21	203	415	11	72	17	38	156	516	11	74	16	42	188	443	12	78	10
	avr-08	21	263	333	10	84	6	20	254	343	11	88	2	148	149	536	11	84	5

Tableau V-7 : Récapitulatif des paramètres texturaux (% de sable, silt et argile) et rhéologiques (seuil d'écoulement, teneur en eau pondérale et concentration massique) des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) sur le bas et le haut de la vasière de Brouage, entre avril 2007 et avril 2008

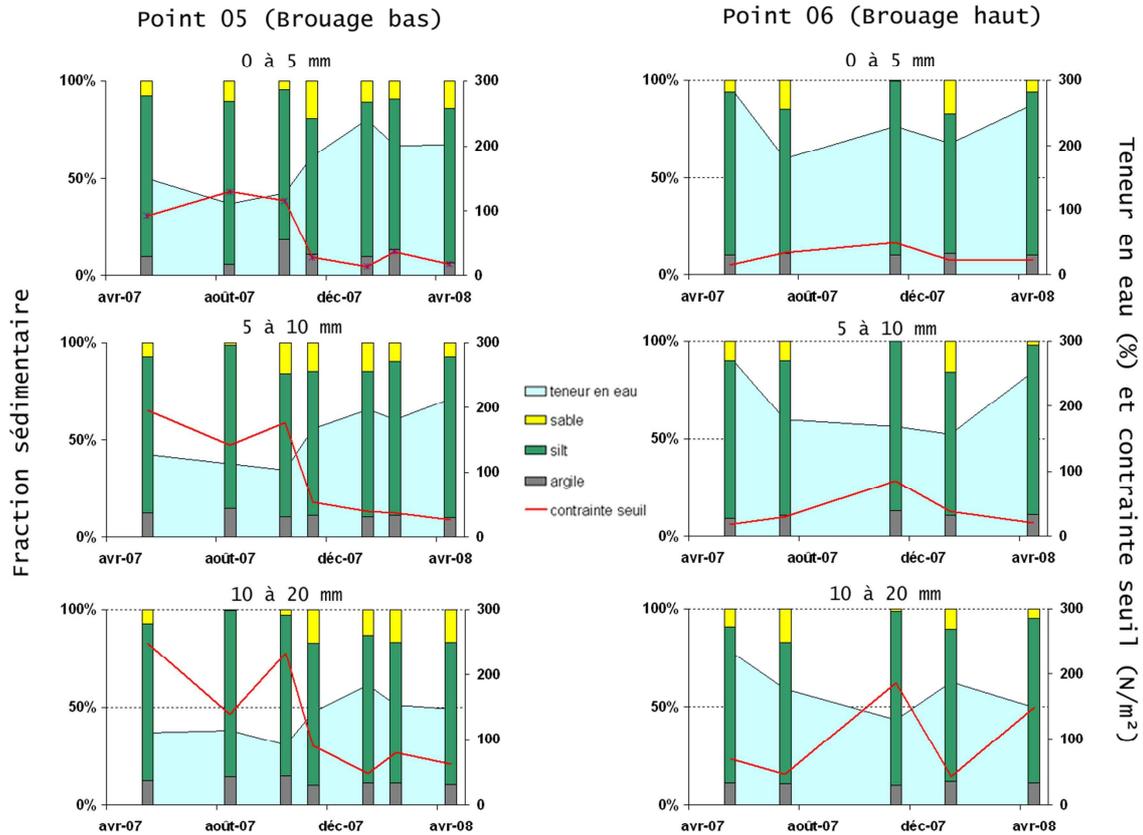


Figure V-25 : Variations des paramètres texturaux et rhéologiques des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) sur le bas et le haut de la vasière de Brouage, entre avril 2007 et avril 2008

V-3.4.2. Variations altimétriques de la surface et influence des apports de la Charente sur la sédimentation de la vasière de Monportail-Brouage

La figure V-26 montre l'évolution de la hauteur des sédiments de la partie basse et de la partie haute de la vasière en fonction du débit journalier de la Charente, de la turbidité enregistrée sur le banc d'Agnas et des hauteurs des vagues enregistrées par les altimètres ALTUS, entre le mois d'avril 2007 et le mois d'avril 2008.

NB : Le signal de turbidité correspond aux enregistrements de la sonde de turbidité présente sur le banc d'Agnas, au niveau du Chapus. Elle constitue un témoin indirect de l'activité du bouchon vaseux de la Charente lorsqu'il est expulsé par le jeu des courants.

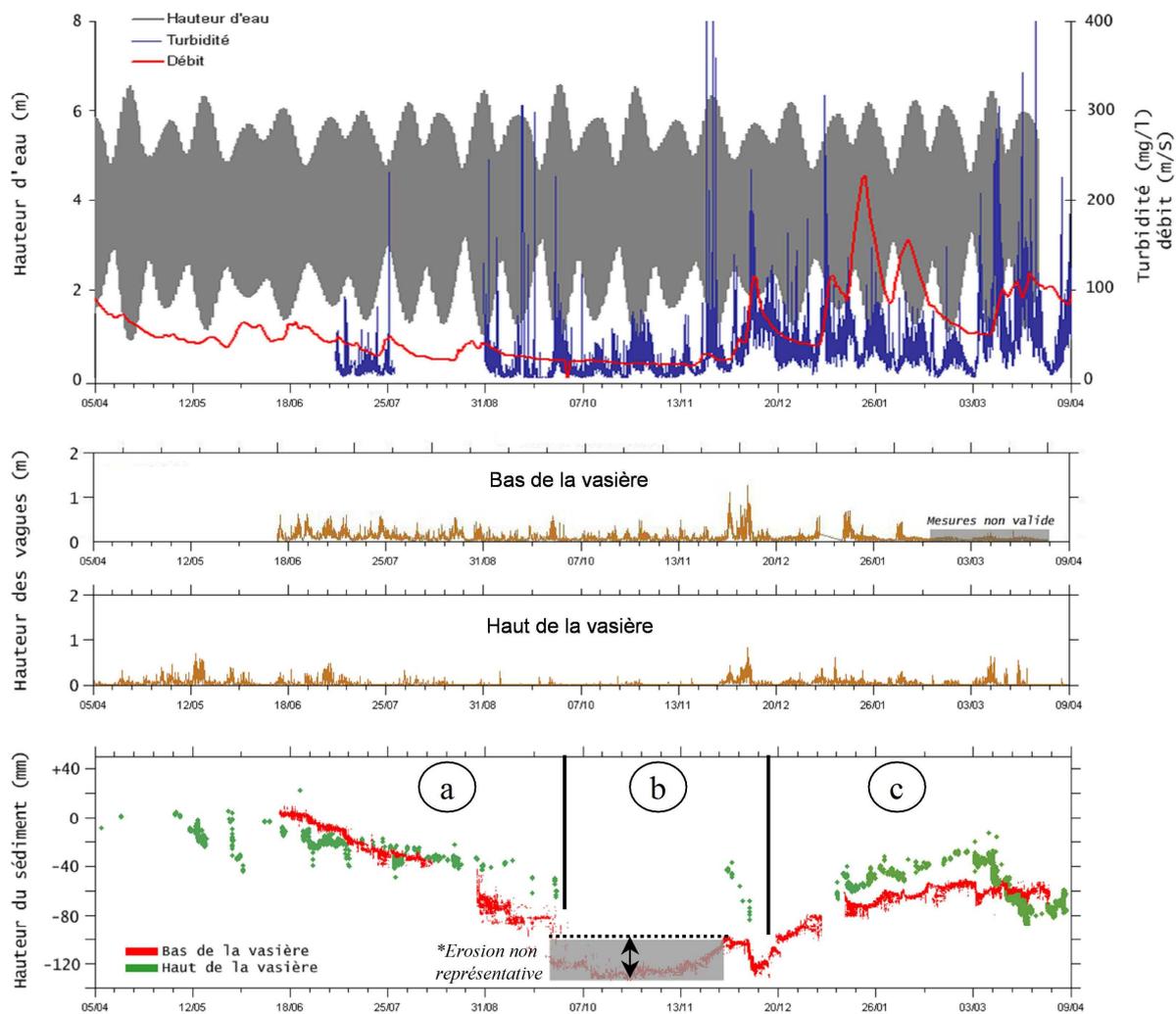


Figure V-26 : Variations altimétriques enregistrées sur le bas et le haut de la vasière, en fonction des débits de la Charente (à St-Savinien), de la turbidité enregistrée au niveau du banc d'Agnas et en fonction des hauteurs de vagues (H_s) sur chacun des sites. Période de mesures : 05/04/07-09/04/08

Les deux parties de la vasière de Monportail-Brouage présentent des variations altimétriques quasiment identiques. Trois situations bien marquées semblent cependant affecter l'ensemble de la vasière :

Situation (a) : En période estivale, les vents ont une orientation Ouest et génèrent en permanence des vagues dans la baie. Cette agitation provoque dans près de 8 et 10% du temps (respectivement en bas et en haut de l'estran), des contraintes (τ_w) sur la surface du fond supérieures à $0,6 \text{ N.m}^{-2}$, permettant l'érosion du mollin. Les deux parties de la vasière sont en érosion constante.

Sur le bas de la vasière, les sédiments, plus consolidés, sont érodés (8 cm en 3 mois) alors que les vagues ne sont pas très importantes. L'érosion de ces sédiments sous forme de petits fragments (fig. V-27) est vraisemblablement liée à la présence de nombreux petits mollusques dans le sédiment (phénomène de bioturbation). Néanmoins, il n'est pas exclu que

l'action répétée des vagues courtes induise également des phénomènes de liquéfaction de l'interface.

En haut de la vasière, le sédiment de type mollin réagit plus vite aux sollicitations des vagues, des variations altimétriques centimétriques rapides étant observées à chaque fois que des vagues affectent la zone.



Figure V-27 : Aspects des sédiments de surface (a) sur le bas de la vasière, le 19/07/07 et (b) sur le haut de la vasière, le 26/07/07. (Photos S.Kervella)

Situation (b) : En automne, les vents ont une orientation E-NE et génèrent peu de vagues. C'est une période relativement calme, les mouvements de l'interface n'étant régis que par les courants de marée.

Sur le haut de l'estran, en dépit de l'absence de données altimétriques, la *quasi*-absence de vagues indique qu'aucune érosion importante ne se produit.

Sur le bas de l'estran (site n°5), un ré-ensablement a lieu (fig. V-26 et fig. V-28). Cependant, du fait d'un problème d'affouillement au début de cette période, l'altimètre ALTUS n'enregistre pas tout de suite cette accrétion. Lorsque le rééquilibrage, entre la hauteur du sédiment sous l'ALTUS et les sédiments à proximité, est effectif, l'interface reste stable. Cet ensablement est vraisemblablement lié à la décantation des MES dans la colonne d'eau.



Figure V-28 : Aspects des sédiments de surface (a) sur le bas (site n°5), le 27/11/07 et (b) sur le haut de la vasière de Monportail-Brouage, le 28/11/07. (Photos S.Kervella)

Situation (c) : A partir du mois de décembre, les premières tempêtes hivernales frappent la baie. La vase est de nouveau soumise à des vagues, conduisant à des érosions de l'interface relativement importantes.

Cependant, une accréation discontinue est observée : 73 mm en 4 mois sur le site n°5 et 50 mm sur le site n°6. Ces dépôts correspondent à du mollin très fluide (fig. V-29). Environ 3 à 4 jours (6 à 8 cycles de marée) après une crue à St-Savinien, un dépôt de sédiment frais se produit à la fois sur le bas et sur le haut de la vase, ceci dans des proportions identiques. Cet apport sédimentaire semble résulter de l'expulsion d'une partie du bouchon vaseux de la Charente, ce constat étant confirmé par l'augmentation de la turbidité enregistrée sur le banc d'Agas 6 à 8 cycles de marées après une crue.



Figure V-29 : Aspects des sédiments de surface (a) sur le site n°5, le 20/02/08 et (b) sur le site n°6 de la vase de Monportail-Brouage, le 23/01/08. (Photos S.Kervella)

Au cours du temps et des crues successives, le bouchon vaseux perd de son volume et expulse moins de MES dans la baie. Les dépôts sur la vase sont donc moins importants au fil du temps.

Des flux de dépôts, après chaque crue, peuvent être calculés (fig. V-30) en prenant comme hypothèse une concentration de 200 g/l d'un mollin immergé et en s'appuyant sur les valeurs de sédimentation obtenues. Le premier dépôt représente une sédimentation de 14 mm en 4 jours, soit un flux de dépôt d'environ $700 \text{ g.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ ou $29,1 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, et le second dépôt est quasiment aussi important, avec 11 mm de mollin en 3 jours, soit un flux de dépôt d'environ $733 \text{ g.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$ ou $30,5 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. Rapportée à la surface de la vase, soit environ 33 km^2 , la résultante de ces flux conduit à estimer un dépôt d'environ 23 000 tonnes de mollin par jour. Cependant, une grande prudence s'impose dans l'interprétation de ce résultat, qui n'est qu'indicatif, car il est issu de l'observation de seulement deux points de la vase de Monportail-Brouage.

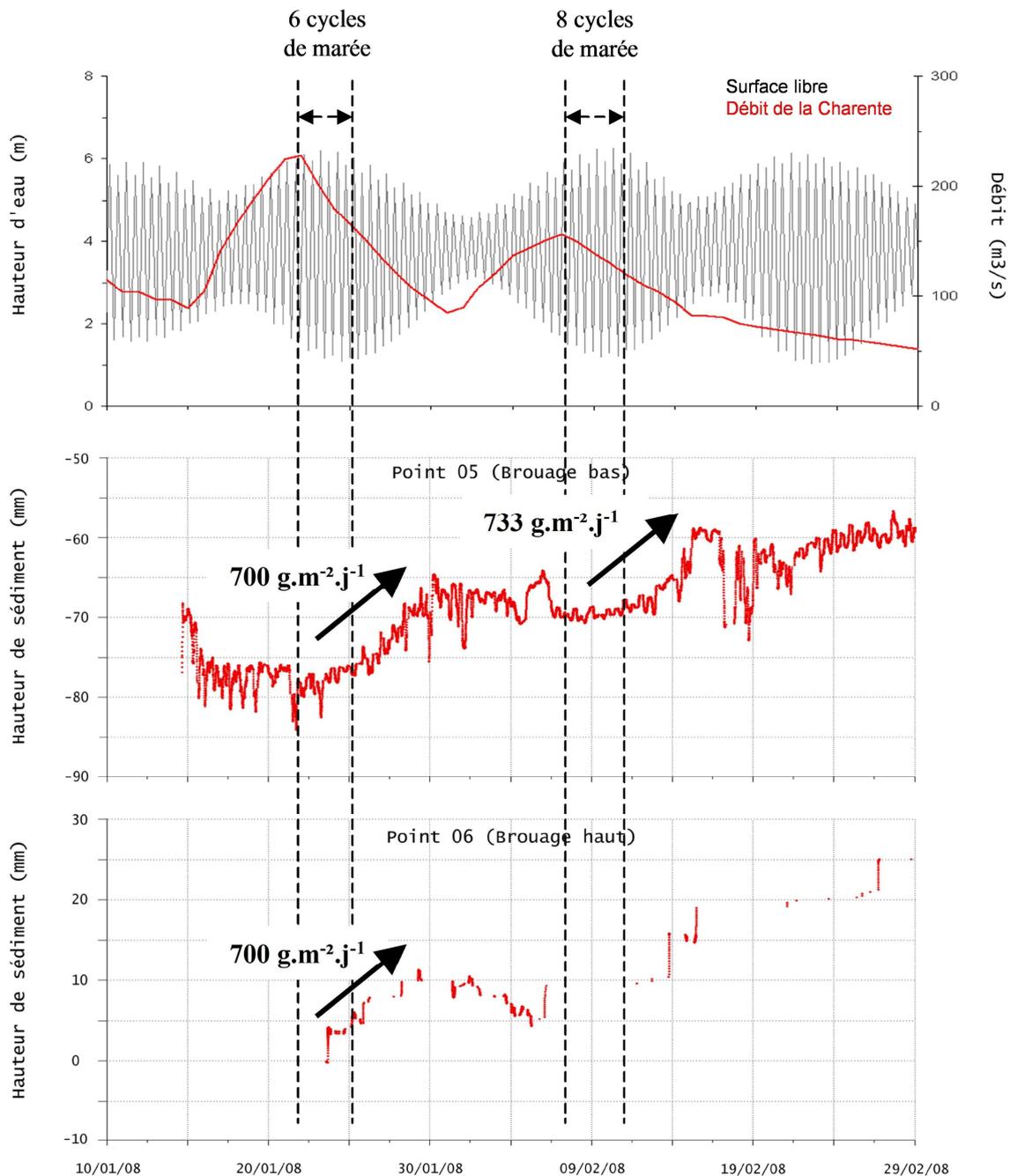


Figure V-30 : Evolution de la hauteur de l'interface sédimentaire sur le bas (b) et le haut (c) de la vasière de Monportail-Brouage en fonction de la hauteur d'eau et du débit de la Charente, entre le 10/01/08 et le 29/02/08

V-.3.5. Sédimentation sur le long terme

L'étude des processus hydro-sédimentaires sur la vasière a été complétée par le prélèvement de carottes (20 cm), qui ont été radiographiées à l'aide de la technique SCOPIX et soumises à une analyse de la décroissance de l'activité isotopique Pb210. Ces observations, associées aux données altimétriques (ALTUS), permettent de relier les événements

d'érosions/dépôts avec les séquences sédimentaires conservées dans le sédiment. De plus, l'analyse isotopique du Pb210 permet de calculer des taux de sédimentation « long terme ».

V-3.5.1. Enregistrement sédimentaire en bas de la vasière

La radiographie de la carotte prélevée début avril 2008 sur le bas de la vasière (site n°5) indique la présence de marques de bioturbations diverses (terriers, coquilles). La carotte est caractérisée par l'existence de trois entités de dépôts (fig. V-31 et V-32):

- La séquence n°1 (SQ1) correspond à un dépôt de mollin ($W = 202\%$, $\tau_y = 17 \text{ Pa}$) qui n'a pas été enregistré par l'ALTUS, ce dernier étant hors de l'eau. Le taux de sédimentation sur le long terme calculé est de l'ordre de $0,092 \text{ cm.an}^{-1}$, cette valeur est similaire à celles mesurés dans les seillons lors de la campagne Intermud (Gouleau *et al.*, 2000).
- La séquence de dépôt n°2 (SQ2), d'une épaisseur de 60 mm, correspond aux dépôts enregistrés par l'altimètre entre le 12/12/07 et le 01/04/08. Ce dépôt ne présente pas de laminations, ni de discordance sur la verticale, alors qu'une sédimentation par paliers a été observée au cours de cette période. Des terriers sont visibles peuvent perturber les dépôts en mélangeant l'interface avec des sédiments plus profonds. Ceci a pour conséquence d'abaisser artificiellement l'activité du Pb210 : il a été décidé d'ignorer alors ce taux, car il correspond plus à une expression du taux de mélange sédimentaire.
- La séquence n°3 (SQ3) montre une activité résiduelle du Pb210. C'est un dépôt ancien, d'un âge supérieur à 100 ans, correspondant au niveau le plus bas atteint en termes d'érosion. Il n'a pas été affecté par les tempêtes de début décembre 2007, car étant très compacté. La limite entre cette séquence et la séquence suivante, est visible sur les variations des niveaux de gris maximum. Ce sédiment est constitué d'éléments très fins (moyenne granulométrique à $10 \mu\text{m}$).

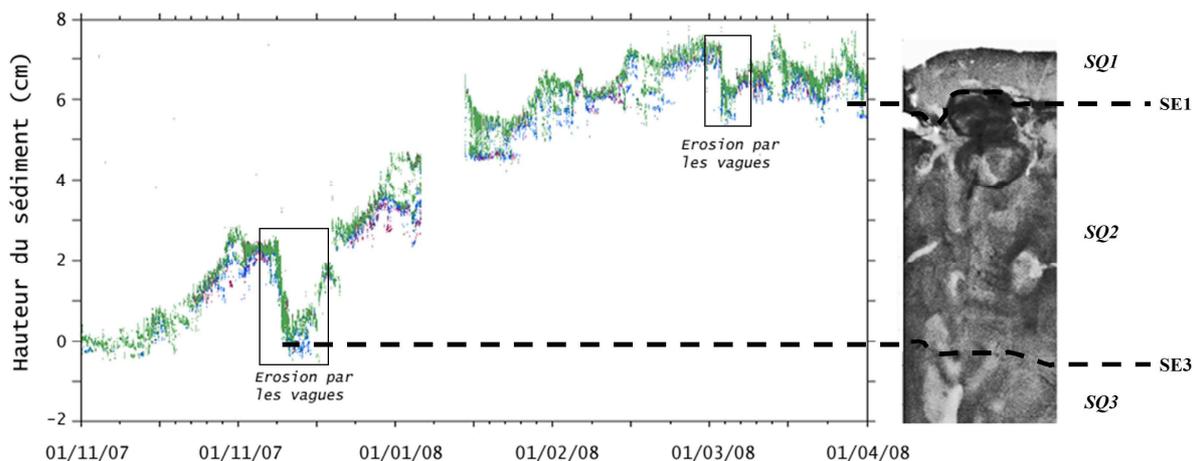


Figure V-31 : Comparaison des enregistrements altimétriques et de l'épaisseur des dépôts frais identifiés à l'aide des rayons X sur le site n°5, le 01/04/08

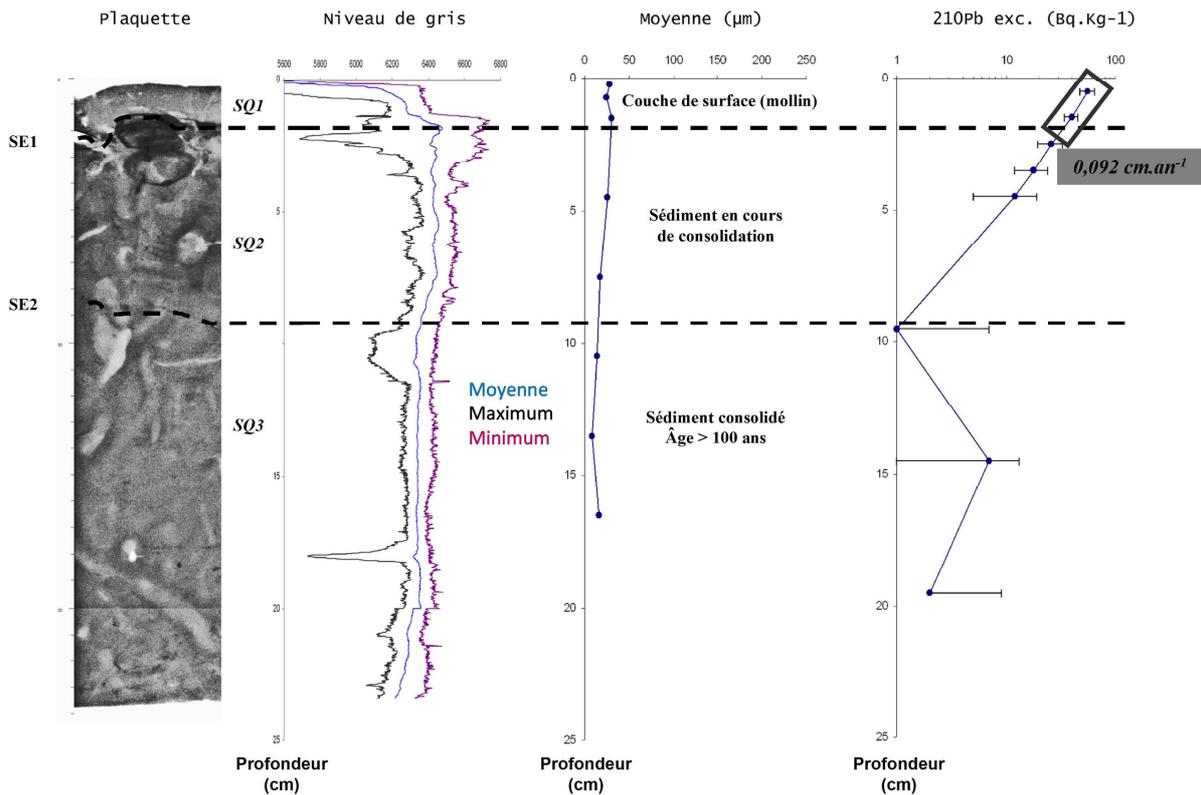


Figure V-32 : Radiographie au rayon X, niveaux de gris, taille moyenne des particules et profil de l'activité du Pb210 en excès sur le bas de la vasière (site n°5) et détermination du taux de sédimentation. Date : 01/04/08

L'étude de cette carotte confirme l'influence tidale relativement faible sur les séquences d'érosions/dépôts. La sédimentation est conditionnée par l'action des vagues, qui empêche la conservation des séquences sédimentaires, mais également par la présence de terriers de mollusques qui fragilisent l'interface.

V-3.5.2. Enregistrement sédimentaire en haut de la vasière

L'analyse de la radiographie de la carotte prélevée sur le site n°6 en avril 2008 montre la présence de très nombreuses structures sédimentaires (fig. V-33 et fig. V-34), sans activité biologique.

- Une faible épaisseur de sédiment récent a été conservée (SQ1 et SQ2). La séquence SQ2 est un dépôt post-tempête, partiellement érodé ou compact, recouvert par la séquence SQ1 plus récente. Aucun taux de sédimentation n'a pu être calculé du fait d'une anomalie dans les teneurs en Pb210 de ces deux couches. Cette anomalie est sûrement due à la présence de lits sableux de faibles épaisseurs.
- Le sommet de la séquence SQ3 montre la présence de petites rides, appelées aussi « berceaux », matérialisés par des structures concaves dans lesquelles du sable fin est piégé. Ils se forment lorsque la vase est soumise à une agitation importante. Or, il s'avère que le 10 mars 2008, une forte tempête a provoqué, sur la zone, des vagues importantes, ce qui a pu contribuer à générer ces formes particulières. Au sein de la

séquence, le taux de sédimentation sur le long terme est d'environ $0,057 \text{ cm.an}^{-1}$: cette valeur est comparable à celles calculés par Gouleau *et al* (2000) dans les seillons de la vasière de Monportail-Brouage.

- La séquence SQ4 traduit un environnement tidal plus classique. Des alternances de lamines de vase, séparées par des litages de sables fins, sont identifiables, rappelant les variations des fractions sédimentaires observées dans le tableau V-9. Ainsi, en période calme, cette partie de la vasière enregistre un signal résiduel des variations de composition texturale de l'interface.
- La séquence SQ5 est relativement homogène, comme en attestent les variations des valeurs du niveau de gris. Néanmoins, des litages sont visibles, identiques à ceux observés dans la séquence SQ2. L'activité du Pb210 est significative (environ 50 Bq.Kg^{-1}), comparable à celle mesurée dans la séquence SQ4.
- La séquence SQ6 présente, également, des alternances de vase et de mélanges sablo-vaseux, avec la présence de berceaux à sa base. L'activité du Pb210 est encore bien marquée à 20 cm de profondeur, ce qui indique que ce sédiment en cours de consolidation à moins de 100 ans. Cependant, l'âge exact de ce dépôt n'a pu être déterminé.

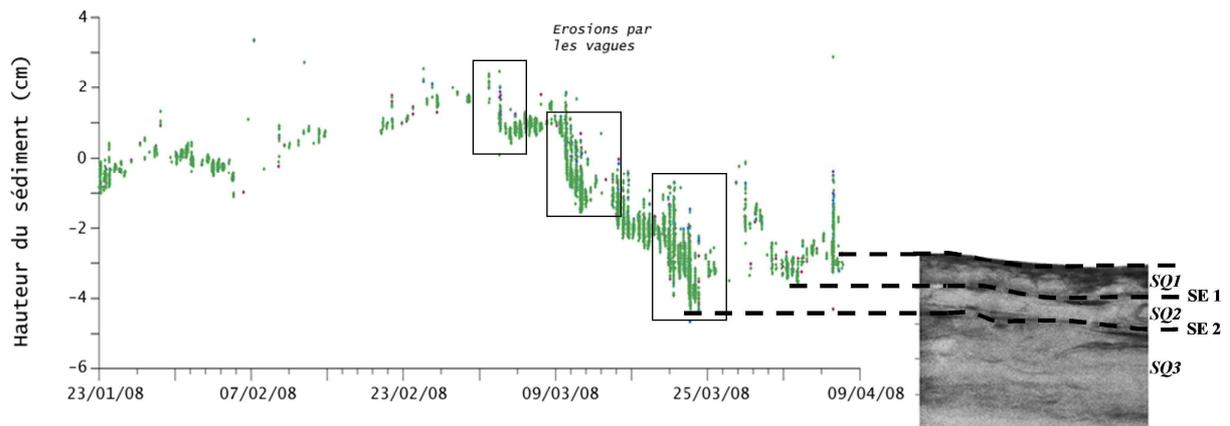


Figure V-33 : Comparaison des enregistrements altimétriques et de l'épaisseur des dépôts frais identifiés à l'aide des rayons X, sur le bas de la vasière, le 01/04/08

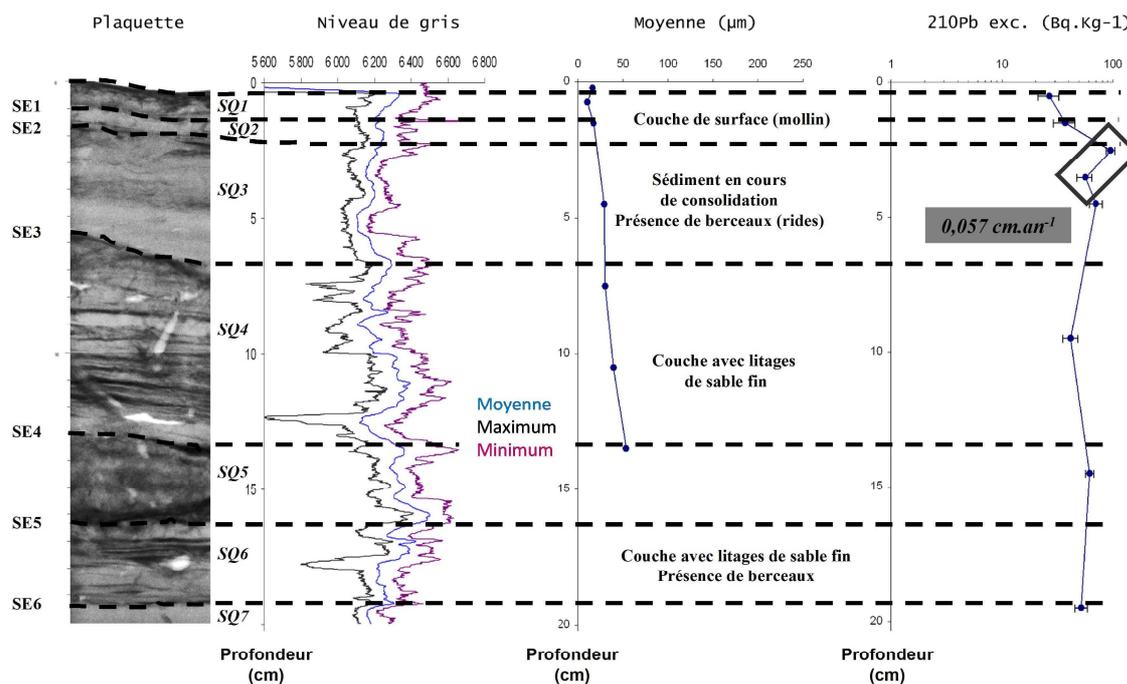


Figure V-34 : Radiographie au rayon X, niveaux de gris, taille moyenne des particules et profil de l'activité du Pb210 en excès, sur le haut de la vasière de Monportail-Brouage (site n°6) et détermination du taux de sédimentation. Date : 01/04/08

Ainsi, le haut de la vasière correspond plutôt à un environnement tidal sous influence temporaire des vagues. Les phénomènes physiques l'emportent sur l'activité biologique. L'activité des vagues étant sporadique, une partie du matériel sédimentaire est conservée. Bien qu'à la fin de l'année d'observation, les enregistrements montrent une vasière en érosion, l'analyse de la carotte de la partie haute (site n°6) indique que cette zone de la vasière semble être en accrétion sur le long terme. L'envasement peut donc être contrarié par des périodes ponctuelles pendant lesquelles l'influence de l'activité des vagues est plus importante que celle de la marée.

V-4. Conclusions

L'étude hydro-sédimentaire et sédimentaire de ces deux zones, sur plusieurs échelles spatio-temporelles, montre de grandes différences quant à leur exposition aux vagues, aux courants de marée les concernant, et aux faciès sédimentaires rencontrés (tab. V-8). Les deux estrans présentent des schémas de fonctionnement très différents et, au sein même de ces environnements, des différences sensibles sont également perceptibles.

			Littoral Est de l'île d'Oléron			Vasière de Monportail-Brouage	
			Site n°1	Site n°2	Site n°3	Site n°5	Site n°6
Vagues	Fenêtre d'exposition		N, NE et E	NW, N, NE et E	NW, N, NE et E	SW, W, et NW	SW, W, et NW
	Hs max (m)		0,9	0,7	1,1	1,2	0,7
	τ_w max (N/m ²)		3	2,8	4	2	2,2
	paramètre de frottement (fw)		0,127	0,043	0,071	0,21	0,028
	pente (%)		0,0028	0,0011	0,002	0,006	0,028
	Hsig/hmax		0,26	0,3	0,33	0,33	0,33
Courant	Vitesse maximale (m/s)	ME (flot-jusant)	-	-	0,20 - 0,16	0,20 - 0,12	-
		VE (flot-jusant)	-	-	0,30 - 0,40	0,50 - 0,30	-
	Contraintes τ_c (N/m ²)	ME (flot-jusant)	-	-	0,30 - 0,20	0,20 - 0,10	-
		VE (flot-jusant)	-	-	0,70 - 0,30	0,90 - 0,90	-
	Turbidité (mg/L)	ME (min-max)	-	-	20	50 - 80	-
		VE (min-max)	-	-	50 - 100	50 - 500	-
Caractéristiques sédimentaires	Variabilité sédimentaire		moyenne	importante	importante	très faible	très faible
	Faciès sédimentaire		Sables vaseux (type I) à vases sableuses (type III)	sables peu vaseux à vases sableuses (type III)	sables	vases (type VI)	vases (type VI)
	Seuil d'écoulement (Pa)	Min-max	25 - 226	101	-	13 - 249	14 - 186
	Concentration (g/l)	Min-max	553 - 928	1056 - 1338	1127 - 1545	359 - 777	305 - 596
	Variations altimétriques (cm)	Ampleur des érosions	-	centimétrique	centimétrique	pluri-centimétrique	pluri-centimétrique
		ΔH	-	- 3 cm	- 2 cm	- 6 cm	- 5 cm

Tableau V-8 : Comparaison des caractéristiques des vagues, des courants et des sédiments que l'on peut rencontrer sur le littoral est de l'île d'Oléron et sur la vasière de Monportail-Brouage

Le platier occidental (côte oléronaise)

A Boyardville (site n°1), les sédiments sont essentiellement des vases, avec parfois, des apports temporaires de sables liés au transit littoral Nord-Sud. La zone des Doux hauts (site n°2) est constituée de sédiments essentiellement sableux, dont les faciès varient cependant au cours de l'année. Sur les Doux bas (site n°3), en dehors des tables ostréicoles, la sédimentation est essentiellement sableuse (sable fin).

Il n'y a quasiment pas d'échanges entre le haut et le bas de l'estran Ouest, du fait d'une direction du courant pendant le flot, quasiment parallèle à la côte (Walker *et al.*, 2006), le transport des particules remises en suspension se faisant plutôt de manière long-shore. Les dépôts, qui ont lieu aux étales de marées, sont érodés pour des contraintes minimales de frottement du courant sur le fond de 0,2 N/m².

Suivant les zones étudiées, l'action des vagues sur l'interface est très différente. La zone de Boyardville est relativement protégée des vagues. Cependant, lors de forts coups de vent, celles-ci peuvent atteindre des hauteurs proches de 1m et entraîner des contraintes τ_w supérieures à 2 N/m². En revanche, les Doux bas constituent une zone relativement ouverte, exposée aux vagues de directions multiples et sous l'influence temporaire des vagues longues issues des grandes houles du large.

Les contraintes de frottement des vagues sur le fond sont souvent élevées ($\tau_w > 4$ N/m²) en cas de fortes tempêtes, ce qui entraîne des séquences d'érosions/dépôts centimétriques. La zone des Doux hauts est moins exposée aux vagues que les deux autres (surtout en période estivale), car elle est relativement protégée des vents d'ouest. En revanche, en hiver, l'action des vagues provoquent des contraintes τ_w pouvant atteindre 2,8 N/m². Cependant, les fronts d'érosion se propagent difficilement dans les sédiments fortement concentrés.

Malgré la présence d'un altimètre à Boyardville, les variations altimétriques de ce site n'ont pu être clairement identifiées. Il ressort, tout de même des discussions avec les ostréiculteurs, concessionnaires à Boyardville et aux alentours, que cette zone semble stable dans le temps. En effet, les bases de pieux cinquantenaires, qui séparaient les zones de cultures de moules des parcs ostréicoles, sont encore visibles un peu partout.

En revanche, la zone des Doux bas (en dehors des concessions ostréicoles), en légère érosion sur l'année, semble être une zone de transit des sédiments sableux, fortement influencée par l'action des vagues.

Sur les Doux hauts, la sédimentation est essentiellement contrôlée par la présence d'herbiers à zostères, en été. Ces derniers induisent un dépôt de vases sableuses, tandis qu'à la fin de l'hiver, lorsqu'ils disparaissent, ces sédiments sont rapidement érodés et remplacés par des sédiments plus sableux, sous l'action des vagues. Sur l'ensemble de l'année, le haut de l'estran présente une stabilité apparente.

Le platier occidentale est donc une zone où de multiples processus hydrodynamiques et biologiques contrôlent la sédimentation. Son exposition aux vagues est importante, hormis dans sa partie Nord. Les vagues sont les principaux agents de remise en suspensions et d'érosion des sédiments, ces derniers subissant un transport long-shore par les courants. Sur le haut de l'estran, l'action stabilisatrice des herbiers est à prendre en compte dans les processus sédimentaires mais également dans les modèles numériques hydro-sédimentaire.

La vasière de Brouage

La vasière est constituée, tout au long de l'année, de sédiments cohésifs de type V (vases). Ces sédiments se déclinent en deux types : des sédiments très fluides ($c < 400$ g/l à l'émersion), reposant sur des sédiments en cours de consolidation, très concentrés ($c > 600$ g/l), relativement anciens, parfois centenaires, et très difficilement érodables, comme l'ont montré les observations *in-situ*.

Les courants de marée sont à l'origine des érosions et des dépôts de mollin sur la vasière. Ces dépôts, d'une concentration comprise entre 300 et 400 g/l, sont érodés lorsque la contrainte de frottement des courants sur le fond dépasse $0,2$ N/m². Les valeurs des flux d'érosion sont comparables à celles calculées sur la vasière Nord en baie de Seine par Verney *et al.* (2007).

Les MES, dans la partie basse sont advectées par les réseaux de seillons (Bassoullet *et al.*, 2000) sur le haut de la vasière, où elles vont décanter en un dépôt de quelques millimètres d'épaisseur, au moment de l'étale de marée haute. Lorsque la marée redescend, ce dépôt est érodé et les MES sont transportées vers le bas de l'estran, ainsi que vers le coureau d'Oléron. Ces mouvements constituent donc un transport sédimentaire cross-shore.

Les vagues affectent régulièrement la vasière : lors d'un fort coup de vent, les contraintes qu'elles entraînent sur le fond peuvent être relativement élevées ($\tau_{wmax} \sim 2$ N.m²), engendrant des érosions centimétriques dans des sédiments en cours de consolidation.

Au printemps et en été, la sédimentation est contrôlée par les vagues qui vont maintenir la partie basse de la vasière en érosion constante, comme l'avait montré Bassoullet

et al. (2000). La présence de bioturbation dans les sédiments, ainsi que la succession des houles dans un laps de temps court (quelques jours), sur la partie basse de la vasière, peuvent faciliter des érosions jusqu'à atteindre un sédiment centenaire consolidé. La partie haute de la vasière est plus stable, mais, à la faveur d'un événement météorologique violent, son interface peut subir des érosions conséquentes.

En automne et jusqu'au début de l'hiver, le plan d'eau sur la vasière est souvent calme et, en l'absence d'apports sédimentaires externes, les séquences érosives sont rares.

En hiver, la sédimentation sur la vasière est contrôlée, en grande partie, par la Charente, l'expulsion d'une partie de son bouchon vaseux, au moment des crues, provoquant un dépôt trois à quatre jours plus tard, sur l'ensemble de la vasière.

L'étude radiographique et isotopique indique que la vasière correspond à un environnement tidal très dynamique dans lequel se surimposent des phénomènes érosion/dépôts à différentes échelles de temps. Cette vasière se rapproche de la vasière de l'embouchure de la Seine, car soumise à l'évacuation du bouchon vaseux (Deloffre, 2005) mais s'en différencie par son exposition aux vagues qui compense les dépôts liés à l'activité de la Charente et les actions des organismes benthiques, notamment sur sa partie basse. Les sédiments anciens y constituent une sorte de fond rigide, sur lequel un « tapis » de sédiments plus fluide et plus récent va bouger sous l'action des vagues et des courants de marée.

Partie VI : Influence de l'ostréiculture sur la
sédimentation d'un banc sableux – Cas du banc de
Lamouroux

VI-1. Introduction

Afin de mieux comprendre les conditions de l'envasement d'une zone ostréicole, le banc de Lamouroux, au centre du bassin de Marennes-Oléron a été choisi comme site-atelier. Ce banc ostréicole est reconnu comme très productif, les professionnels l'utilisant pour la dernière phase de croissance des huîtres, avant commercialisation. De plus, le banc de Lamouroux est assujéti à une réglementation d'enlèvement des concessions, les élevages étant mis en place en juin et retirés à la fin du mois de novembre, ce qui permet d'étudier finement la part des huîtres et de leurs installations dans les variations altimétriques et sédimentaires du banc, sur plusieurs échelles temporelles. Les objectifs de notre étude sur ce site atelier sont de :

- caractériser les variations altimétriques de l'interface en relation avec la présence des structures ostréicoles et les facteurs hydrodynamiques locaux ;
- mettre en avant les variations saisonnières de la composition texturale des sédiments de surface et définir l'origine de ces variations ;
- évaluer les dépôts générés par les huîtres ;

Afin de réaliser ces objectifs, deux altimètres *in situ* (ALTUS) ont été installés sur le banc, entre le mois de juin 2007 et le mois d'avril 2008 (fig. VI-1). Le premier d'entre eux a été placé directement sous une table à huîtres et le second à l'extrémité d'une table à proximité d'une allée de circulation professionnelle. Au moment de l'installation, le sédiment était constitué de sable. Un courantomètre de type ADV a été installé entre le mois d'octobre et le mois de décembre 2007. Des prélèvements mensuels de l'interface (0-2 cm) ont également été réalisés, afin de caractériser les sédiments d'un point de vue sédimentologique et mécanique. En plus de ces mesures et de ces prélèvements, des relevés bathymétriques à haute résolution de la partie ostréicole du banc ont été réalisés entre 2005 et 2008 dans le cadre du Contrat de Projet Etat-Région (CPER) Charente-Maritime et piloté par O.Lemoine et P.Geairon (Ifremer).

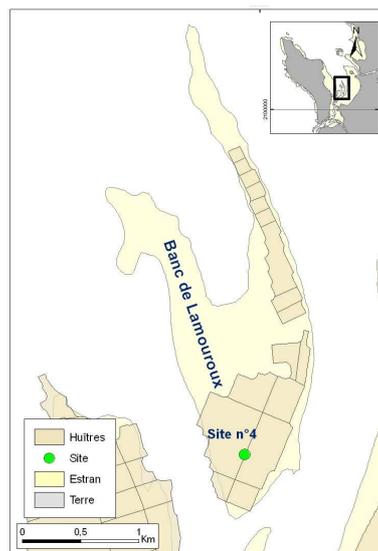


Figure VI-1 : Position du site de mesures hydro-sédimentaire sur le banc de Lamouroux

VI-2. Conséquences de la présence des tables ostréicoles sur la sédimentation

VI-2.1. Modifications sédimentaires et évolution verticale de l'interface en relation avec la production des huîtres

VI-2.1.1. Modifications sédimentaires

L'étude sédimentaire montre une variation saisonnière des faciès sédimentaires (tab. VI-1 et fig. VI-2). Avant l'installation des tables, les sédiments de surface des deux sites sont sableux avec moins de 5% de fraction fine ($< 50 \mu\text{m}$). A partir du mois de juin, lorsque les tables et les huîtres sont installées, il se produit une augmentation très rapide de la fraction fine dans les sédiments qui atteint un maximum en septembre. Ce sont des vases de type V, très fluides ($c=440 \text{ g/l}$) et présentant des seuils d'écoulement (τ_y) très faibles (38 Pa). Ce niveau repose sur un dépôt de même composition, mais en cours de consolidation ($c=570 \text{ g/l}$), avec un seuil d'écoulement (τ_y) de 65 Pa. Cette situation perdure jusqu'à la fin du mois de novembre, les concentrations des sédiments de surface oscillant alors entre 349 et 459 g/l et les seuils d'écoulement (τ_y) variant de 19 Pa en surface à 69 Pa, à 10 mm de profondeur.

A l'extrémité de la table, la même évolution est constatée, mais avec un envasement décalé d'environ 1 mois. Néanmoins, la composition des sédiments de surface semble plus variable. La sédimentation liée aux tables, et aux huîtres, affecte d'abord les zones sous les tables ostréicoles, et ensuite les zones voisines par un phénomène d'auréole.

A partir du mois de décembre, les tables et les huîtres sont enlevées. Une série de violentes tempêtes affecte alors la baie (*cf.* part. VI-3.). Les faciès sédimentaires changent complètement et redeviennent à nouveau sableux en surface (érosion, puis dépôt). Une partie des sédiments vaseux a disparu, dont leurs traces sont retrouvées cependant entre 5 à 10 mm de profondeur.

		Niveau 0-5 mm						Niveau 5-10 mm						Niveau 10-20 mm					
		ty	W	concentration	argile	silt	sable	ty	W	concentration	argile	silt	sable	ty	W	concentration	argile	silt	sable
		(N/m ²)	(%)	(g/l)	(%)	(%)	(%)	(N/m ²)	(%)	(g/l)	(%)	(%)	(%)	(N/m ²)	(%)	(g/l)	(%)	(%)	(%)
Bout de table	avr-07	-	28	1521	1	4	95	-	29	1498	1	5	94	-	28	1521	1	4	95
	août-07		94	759	4	25	72	78	119	638	9	57	33	86	117	646	14	86	0
	sept-07	26	143	583	6	51	43	51	91	777	6	37	57	89	69	937	6	34	60
	oct-07	15	209	405	9	81	10	25	206	410	11	89	0	64	112	668	13	87	0
	nov-07	30	141	559	7	69	24	50	157	514	9	71	21	57	167	488	9	76	15
	déc-07	-	51	1127	2	12	85	54	83	828	5	36	60	68	140	563	8	67	25
	janv-08	-	41	1270	2	9	89	-	58	1045	4	24	72	83	78	864	7	42	51
	févr-08	-	36	1356	1	2	97	-	38	1320	3	13	84	-	35	1375	1	3	96
avr-08	-	35	1375	1	2	97	-	37	1338	1	5	93	-	36	1356	1	6	93	
Sous table	avr-07	-	28	1521	1	4	95	-	29	1498	1	5	94	-	28	1521	1	4	95
	août-07	27	131	593	7	52	42	47	146	544	9	65	26	71	106	696	10	63	27
	sept-07	38	192	435	12	85	4	39	185	449	13	82	5	65	137	572	11	71	18
	oct-07	19	249	349	10	84	5	31	187	445	11	73	16	38	194	432	12	85	3
	nov-07	48	180	459	11	81	8	61	189	441	12	88	0	69	183	453	12	83	4
	déc-07	-	59	1034	5	29	66	65	127	607	8	59	34	68	167	488	10	72	17
	janv-08	-	39	1303	2	6	92	-	51	1127	4	20	76	106	80	849	7	39	54
	févr-08	-	46	1194	4	18	78	-	49	1153	4	20	76	-	68	946	6	31	63

Tableau VI-1 : Récapitulatif des paramètres sédimentologiques (% de sable, silt et argile) et rhéologiques (seuil d'écoulement, teneur en eau pondérale et concentration massique) des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) à l'extrémité d'une table et sous une table ostréicole, sur le banc de Lamouroux, entre avril 2007 et avril 2008

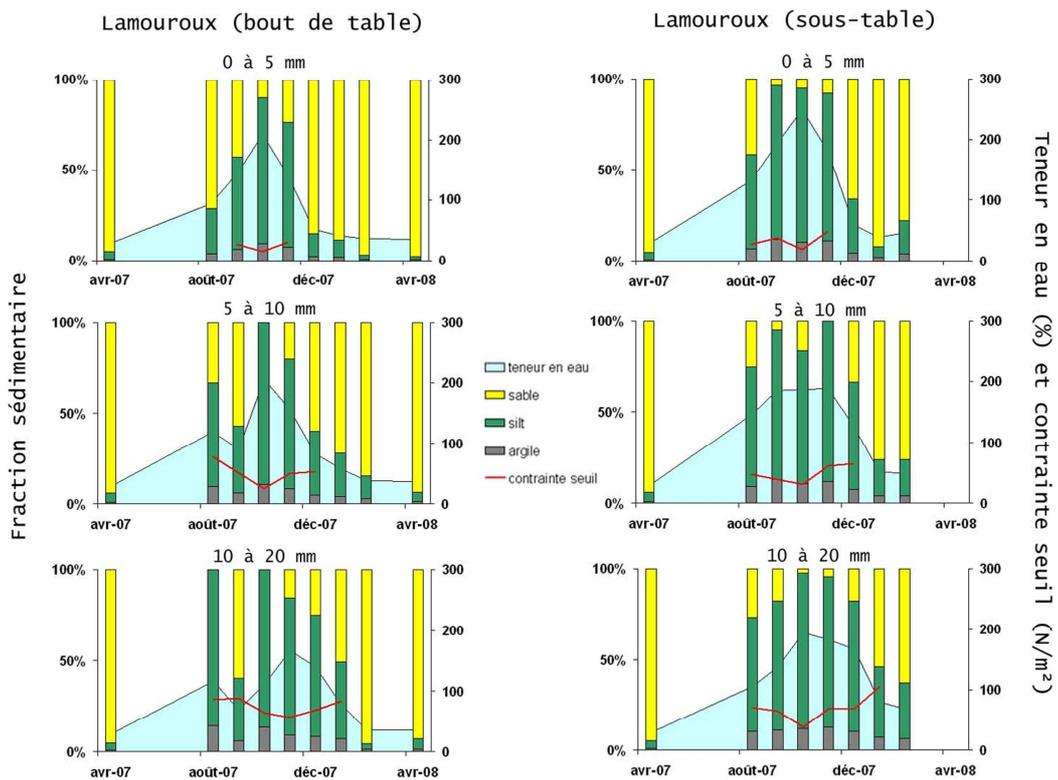


Figure VI-2 : Variations des paramètres sédimentaires (% de fractions sableuse, silteuse et argileuse) et rhéologiques (seuil d'écoulement) des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) à l'extrémité d'une table et sous une table ostréicole sur le banc de Lamouroux, entre avril 2007 et avril 2008

VI-2.1.2. Evolution de la hauteur des sédiments

Les enregistrements altimétriques (fig. VI-3) montrent un envasement progressif relativement important sous les tables sur une interface sableuse, entre le mois de juillet et la fin du mois de novembre. A la fin du mois de novembre, un dépôt de 100 mm de vase s'est formé en 4 mois et demi. Bien qu'au cours de l'été, quelques événements météorologiques ont provoqué des vagues sur la zone et des contraintes de frottement (τ_w) fortes (ex : 29/08, $\tau_w=1,9$ N/m² ou encore le 14/11, $\tau_w=0,9$ N/m²), aucune érosion n'a été observée. Il semble que les tables aient joué un rôle protecteur vis-à-vis de l'interface sédimentaire. L'exhaussement était donc progressif et régulier, la vitesse d'envasement étant estimée à 20 mm/mois, soit 0,7 mm/jour.

A l'extrémité de la table, l'envasement ne commence véritablement qu'à partir de la fin du mois de juillet. Avant cette période, le signal altimétrique est typique des environnements sableux. A partir de la mi-août, l'envasement est effectif : il est moins important que sous les tables, mais présente la même évolution que dans la situation précédente. Au début de l'hiver, vers le 13/11/07, 50 mm de vase ont été déposés au bout de la table, alors qu'au même moment il y avait 70 mm de vase sous les tables.

Les tables occupant environ les 2/3 de la surface de la zone ostréicole du banc, les observations visuelles réalisées sur l'ensemble du banc à la fin du mois de novembre ont montré que les épaisseurs de vase variaient entre 50 et 200 mm. En prenant comme moyenne, pour l'ensemble de la zone ostréicole, la hauteur de dépôt mesurée par l'ALTUS sous table, soit 10 cm, il est possible d'estimer le volume de sédiment vaseux qui s'est déposé sur le banc de Lamouroux en 2007. Compte-tenu que la superficie des zones ostréicoles concernée est de 885 000 m² (en excluant la branche Nord-Est qui présente une sédimentation sableuse tout au long de l'année), le volume de vase déposée au cours de l'été est estimé de l'ordre de 88 500 m³.

En se basant sur les concentrations mesurées dans les sédiments vaseux sous les tables (tab VI-1), une concentration moyenne des dépôts d'environ 600 à 700 g/l est fixée pour l'ensemble de l'épaisseur de sédiment déposé. En rapprochant le volume calculé précédemment avec ces concentrations, la masse de vase déposée sur le banc, au cours de l'été 2007 serait alors comprise entre 53 000 et 62 000 tonnes.

Début décembre, après l'enlèvement de l'ensemble des tables ostréicoles garnies de leurs poches, deux violentes tempêtes ont affecté la zone entre le 2 et le 12 décembre, engendrant des vagues, qui ont provoqué l'érosion *quasi* complète de toute la vase accumulée au cours de l'été précédent. Les processus érosifs sont présentés dans la partie VI-3. Après ces événements, l'interface redevient sableuse, les variations altimétriques n'étant plus liées à l'activité ostréicole. Les séquences d'érosions/dépôts, sous l'influence des vagues, se font autour d'un niveau moyen. Sous les tables, le front d'érosion affecte presque la totalité du dépôt vaseux estival, soit environ 90 mm, jusqu'au contact d'un niveau plus sableux. En revanche, à l'extrémité de la table, le nouveau niveau sédimentaire se trouve altimétriquement en dessous de celui d'origine : l'épaisseur de vase étant moins importante au moment des tempêtes, l'interface sableuse a été fortement érodée.

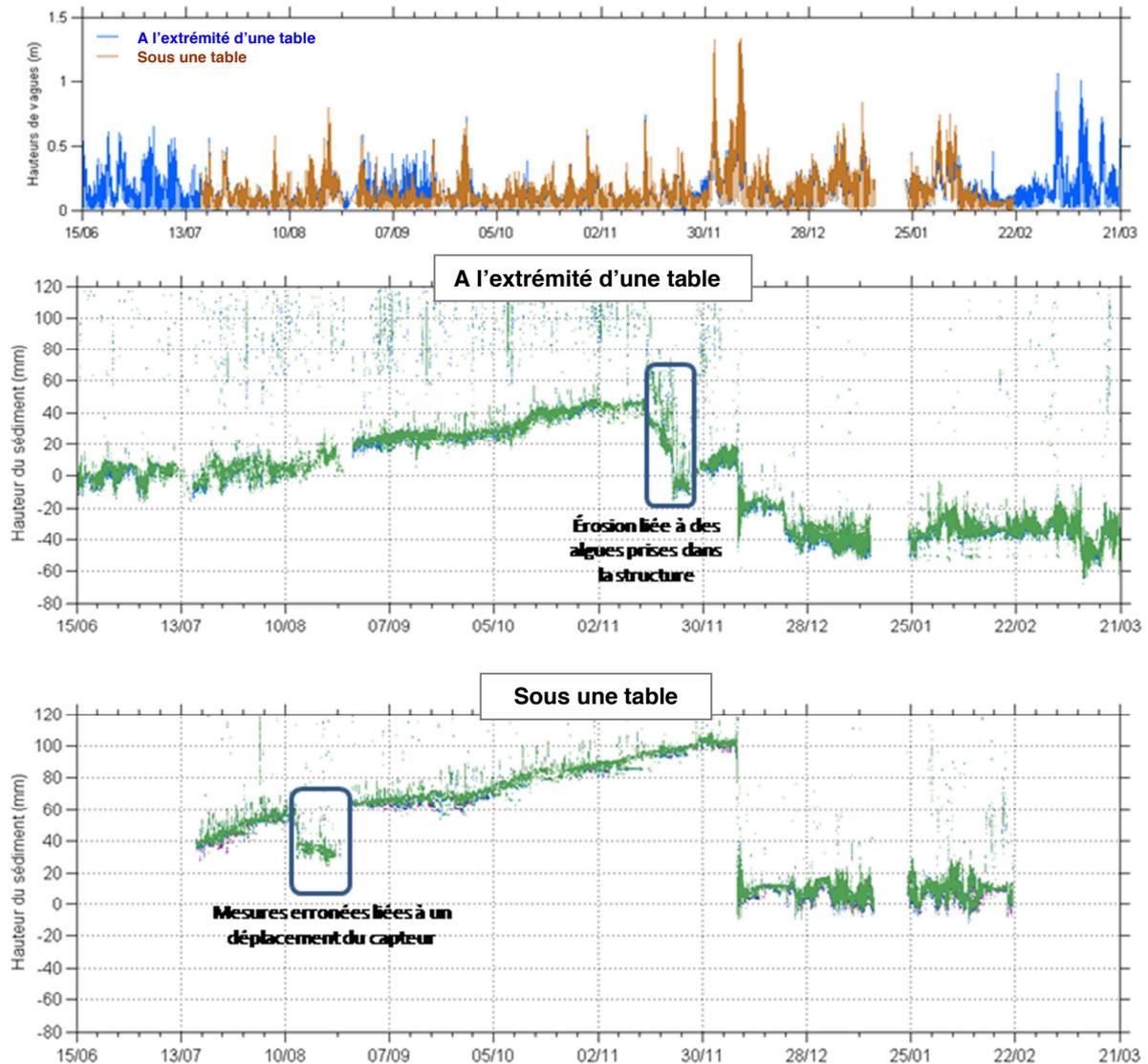


Figure VI-3 : Variations de la hauteur des sédiments, (b) à l'extrémité d'une table ostréicole, (c) sous une table ostréicole et (a) en fonction de la hauteur des vagues, entre le 15/06/07 et le 21/03/08

VI-2.2. Evaluation des dépôts générés par les huîtres

Il a été montré que les tables ostréicoles entraînent un ralentissement des courants près du fond, et peuvent réduire la hauteur des vagues (Kervella *et al.*, 2009b; Sornin, 1981), ce qui peut entraîner une sédimentation sous ces installations.

A ce rôle d'obstacle hydrodynamique, s'ajoute l'effet par biodéposition des rejets (fèces et pseudofèces) provenant des huîtres. Cette biodéposition peut être évaluée à l'aide d'un modèle d'écophysiologie (Hawkins *et al.*, 1998), basé sur le comportement alimentaire de l'huître *Crassostrea gigas* à Marennes-Oléron. Les équations du modèle prennent en compte les interdépendances fonctionnelles observées entre les différents composants des

processus d'alimentation des huîtres, ceci afin de prédire le comportement alimentaire et le taux d'absorption organique net des huîtres.

L'utilisation de ce modèle écophysiological permet d'estimer la production des rejets des huîtres en fonction de la teneur en matières en suspension (seston total : TPM), et de la capacité des huîtres à filtrer (taux de filtration : FR) et à ingérer (taux d'ingestion : IR) ces suspensions.

Equation du taux de filtration (FR) :

$$FR = 0,64 . TPM^{1,22}$$

Equation du taux d'ingestion (IR) :

$$IR = 1,07 . TPM^{0,69}$$

Les variables utilisées sont les quantités de sestons présents dans la colonne d'eau (TPM) et le poids sec standard des huîtres (fig. VI-4). La différence de ces deux paramètres (FR et IR) détermine la quantité de pseudofèces rejetée par une huître, le flux de dépôt et le poids des sédiments déposés pouvant être alors calculées (fig. VI-4). Une densité de 1,2 pour les fèces et pseudofèces a été retenue (Razet Daniel, communication personnelle) pour la transformation du poids des dépôts secs (kg) en volume (l). Or 1 litre correspond à 0,001 m³, il est donc possible, pour une surface d'1 m², de déterminer la hauteur de biodépôt accumulé sur le fond.

Les données de quantité de matières en suspension (MES) proviennent de la base de données RAZLEC d'Ifremer, issues de prélèvements bimensuels en ME et en VE. Elles ne représentent pas les variations à court-terme (semi-diurne) de MES dans la baie. Cependant, elles renseignent sur les tendances à moyen et long terme.

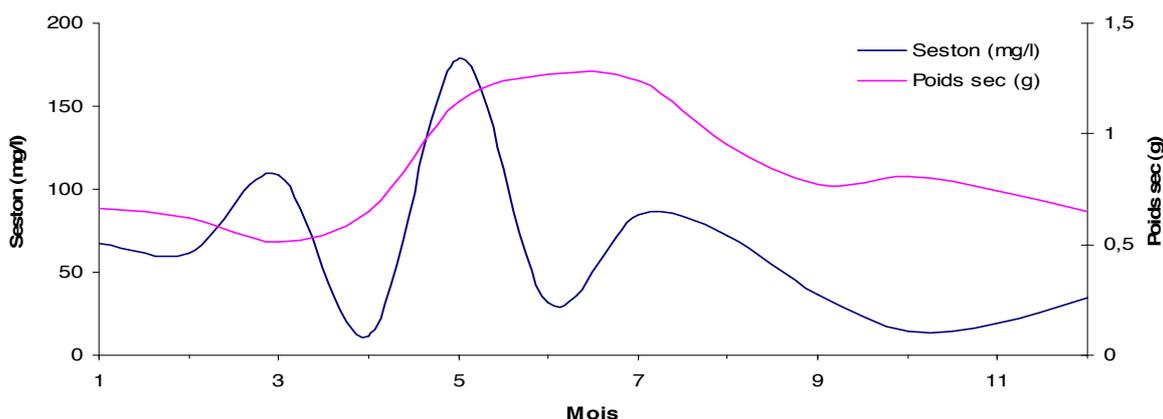


Figure VI-4 : Evolutions mensuelles de la masse moyenne des sestons dans la colonne d'eau et du poids sec moyen des huîtres dans la baie de Marennes-Oléron, en 2007

Afin de modéliser les dépôts générés par les huîtres sur le banc de Lamouroux, il est important de prendre les paramètres les plus proches de la réalité (nombre d'huîtres par m², temps d'immersion). Il a été considéré que sur une surface de 1 m², deux poches contenaient

220 huîtres. Le temps d'immersion des huîtres a été estimé à 88% sur le banc, tandis que le temps de présence des huîtres sur le banc, du 1er juin 2007 au 1er décembre 2007, a été estimé de 100 %, d'après les observations *in situ*.

Les résultats indiquent (fig. VI-5) qu'entre le mois de juin et le mois de novembre 2007, la consommation des huîtres a atteint un pic en juillet, ayant entraîné un flux de dépôts de 158 mg/h/huîtres, provoquant alors un dépôt simulé d'environ 11,3 cm en décembre (fig. V-6).

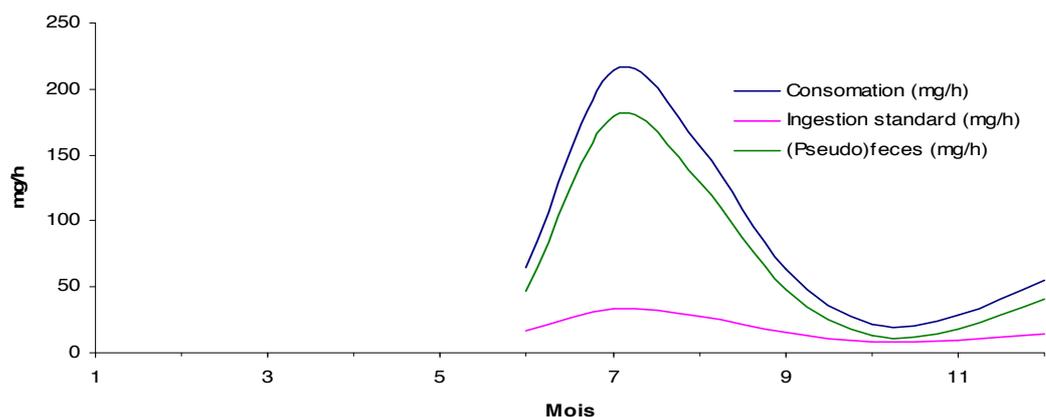


Figure VI-5 : Estimation de l'évolution mensuelle de la consommation, de l'ingestion et des rejets des fèces et pseudofèces par les huîtres sur le site du banc de Lamouroux, en 2007

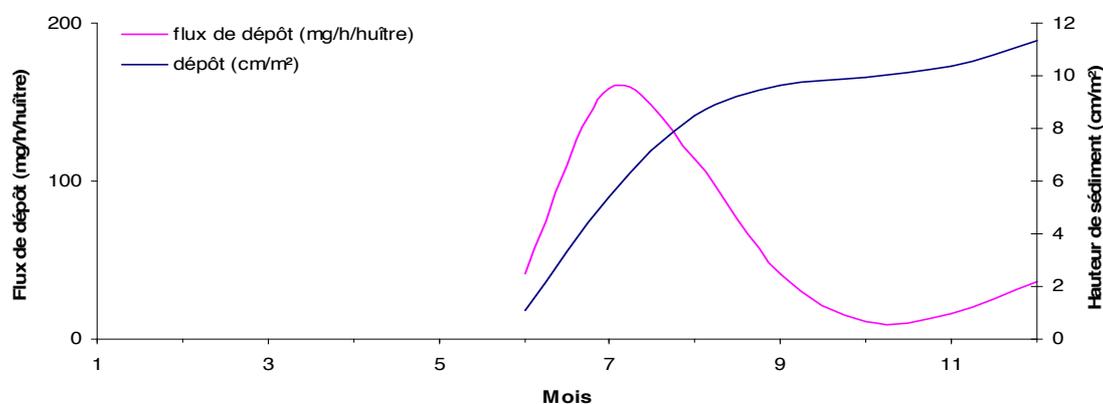


Figure VI-6 : Estimation de l'évolution mensuelle des flux de dépôts et de l'épaisseur de sédiment déposé par les huîtres, sous deux poches, sur le banc de Lamouroux, en 2007

La simulation étant totalement indépendante des mesures, elle n'a pas fait l'objet d'ajustements. La comparaison entre le dépôt simulé, et le dépôt observé montre que les résultats du modèle sont cohérents avec les observations (fig. VI-7), en prenant en compte les 4 cm de dépôt qui ont eu lieu avant l'installation de l'altimètre, situé sous la table. Les deux courbes d'envasement se superposent bien, sauf au mois d'octobre où un affouillement sous le capteur ALTUS a perturbé la mesure. La courbe altimétrique du sédiment donnée est cependant toujours en dessous de celle fournie par le modèle, vraisemblablement parce que le sédiment se tasse naturellement. Or ce tassement n'est pas pris en compte dans le modèle de Hawkins, de même que les effets des courants de marée et des vagues.

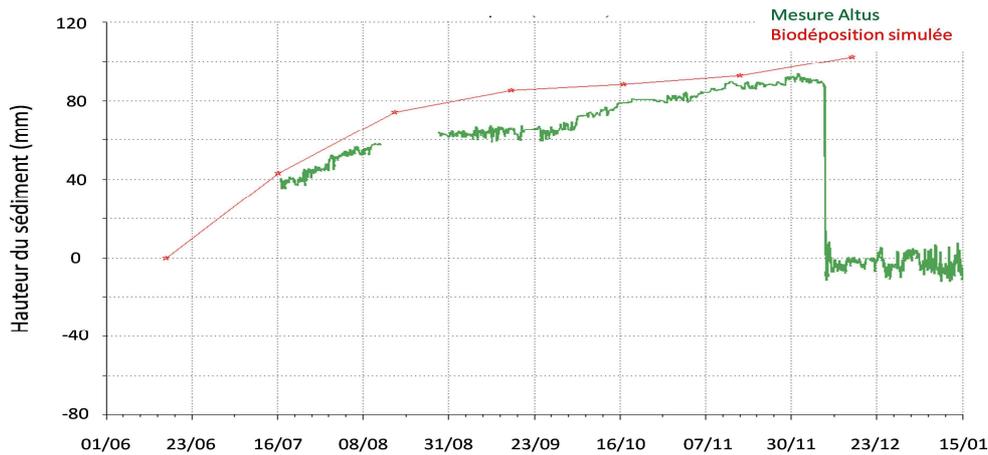


Figure VI-7 : Comparaison entre l'épaisseur des dépôts simulés, provoqués par les huîtres, et les épaisseurs mesurées par l'altimètre « sous table », entre le mois de juin et le mois de décembre 2007

L'ensemble table+poches jouent vraisemblablement un rôle « protecteur » sur les biodépôts, vis-à-vis des forçages extérieurs (vagues, courants). Ce constat pourrait expliquer le fait que les mesures suivent assez bien les résultats du modèle de Hawkins.

VI-3. Impact des tempêtes sur la stabilité des bio-dépôts

NB : Concernant le calcul des contraintes générées par les vagues et les courants sur le fond, deux longueurs de rugosité ont été choisies en fonction de la période de l'année :

- entre le 15/06/07 et 09/12/07, $z_0 = 0,2$ mm (valeur correspondante à un sédiment vaseux selon Soulsby) ;
- entre le 10/12/07 et le 21/03/08, $z_0 = 0,5$ mm (valeur correspondante à un sédiment sableux toujours selon Soulsby).

Pendant l'été 2007, environ 10 cm de vase se sont déposés sur le banc de Lamouroux. Ce dépôt, lié à l'activité biologique des huîtres, correspond à une vase (type V), présentant une concentration comprise entre 400 à 900 g/l, avec des seuils d'écoulement (τ_y) compris entre 34 et 48 Pa. Cette couche de vase reposait sur une interface sableuse.

Au cours des dix premiers jours du mois de décembre 2007, deux violentes tempêtes ont frappé la baie de Marennes-Oléron. Ces tempêtes ont provoqué l'érosion d'une partie, voire de la totalité, du dépôt estival (fig. VI-8) dont les causes seront présentées et discutées ci-après.



Figure VI-8 : Comparaison de l'aspect des sédiments de surface entre le 26/11/07 et le 12/12/07 sur le banc de Lamouroux. (a) Le 26/11/07, le sédiment est une vase très fluide, d'épaisseur pluri-centimétrique ; (b) Le 12/12/07, le sédiment de surface est sablo-vaseux à sableux. Des figures d'érosion de plusieurs mètres carrés sont visibles, ainsi que des rides de clapots. (Photos : S.Kervella)

VI-3.1. Caractéristiques des tempêtes

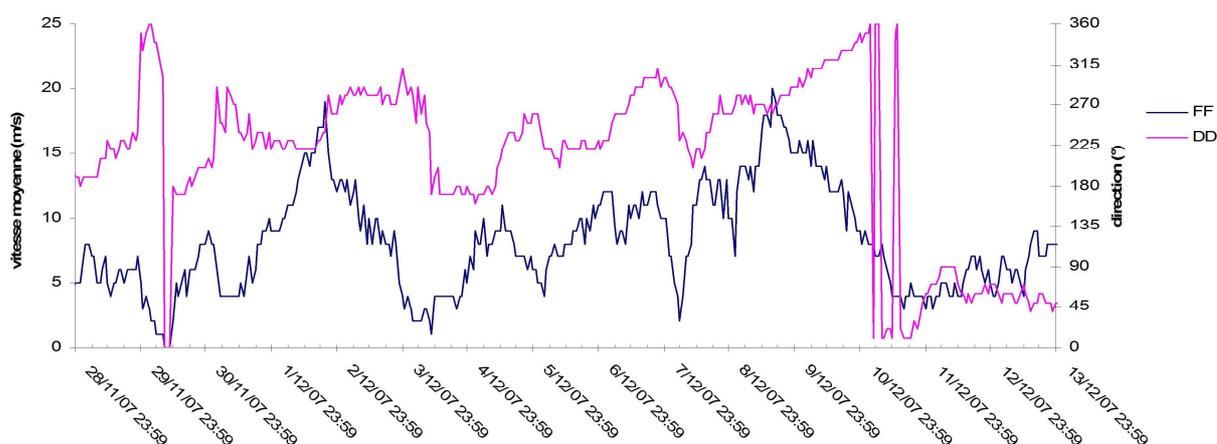


Figure VI-9 : Vitesses et directions moyenne horaire du vent, entre le 28/11/07 et 13/12/07, mesurées par Météo France au phare de Chassiron (Île d'Oléron)

La première tempête est arrivée par le secteur Sud-Ouest, dans la journée du 02/12/07 (fig. VI-9), en ME. Les vents les plus forts (vitesse moyenne au phare de Chassiron : 19 m/s, rafale maximale : 27 m/s) ont été enregistrés en fin de journée, établis d'abord au secteur Sud-Ouest au début, puis orientés au secteur Ouest, en faiblissant progressivement jusqu'au 4 décembre. Les vagues, au milieu du golfe de Gascogne, ont dépassé 7 m de hauteur, atteignant 5 m à l'entrée des pertuis charentais (fig. VI-10), avec une forte composante Ouest, ainsi que Sud-Ouest, comme en témoigne leur spectre de direction.

La deuxième tempête est arrivée par l'Ouest, moins d'une semaine après, dans la journée du 09 décembre, en période de VE. Les vitesses maximales de vent (vitesse moyenne

au phare de Chassiron : 20 m/s, rafale maximale : 29 m/s) ont été atteintes en fin de journée (fig. VI-9), d'orientation Nord-Ouest, puis Nord, faiblissant progressivement jusqu'au 11 décembre. Cette tempête était encore plus violente que la première, notamment quant à la houle soulevée. Dans le golfe de Gascogne, les vagues ont dépassé 11 m de hauteur (fig. VI-11), atteignant près de 8 m à l'entrée des pertuis, avec un spectre directionnel très resserré de secteur Ouest.

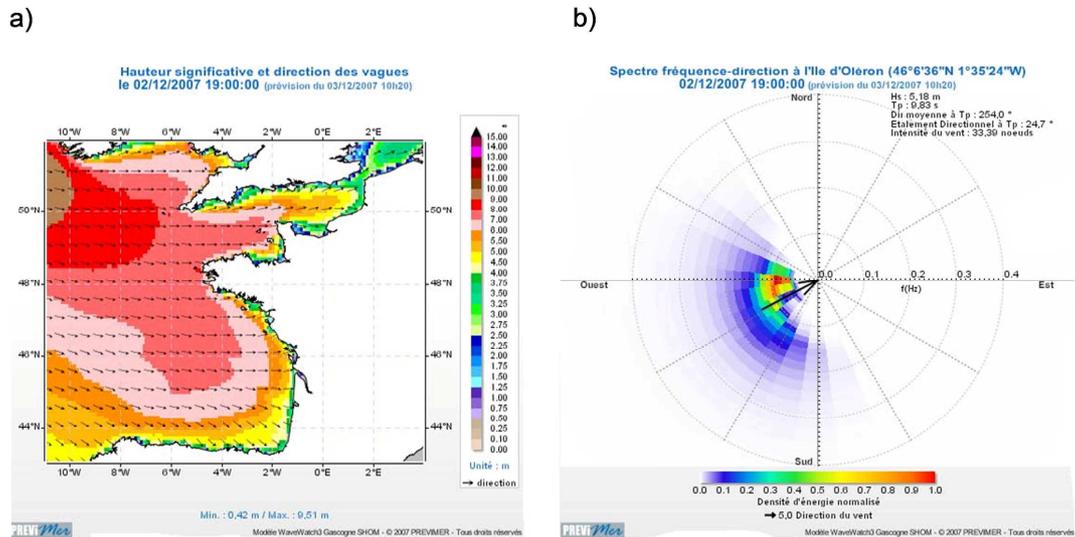


Figure VI-10 : Caractéristiques (a) des hauteurs significatives et (b) du spectre de fréquence-direction des vagues au niveau de l'île d'Oléron, le 02/12/07 à 19h (Données Prévimmer)

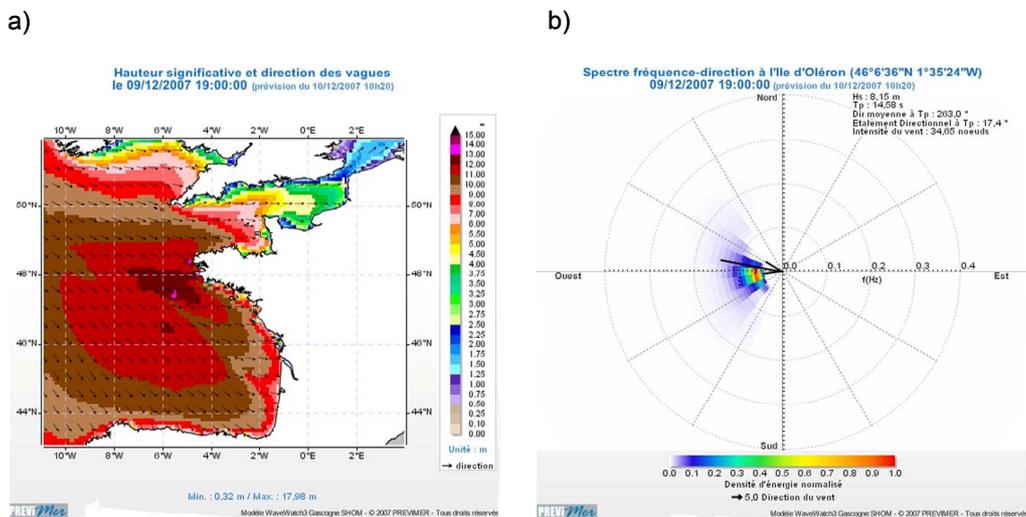


Figure VI-11 : Caractéristiques (a) des hauteurs significatives et (b) du spectre de fréquence-direction des vagues au niveau de l'île d'Oléron, le 09/12/07 à 19h (Données Prévimmer)

VI-3.2. Forçages sur le banc et réponses de l'interface sédimentaire

VI-3.2.1. Observations à l'échelle de la tempête

L'analyse des mesures hydrodynamiques et altimétriques, au cours de cette période, permet d'observer 7 épisodes conduisant à une érosion en masse. Ces épisodes sont indiqués sur la figure VI-12.

Séquence 1 : C'est une **période calme**. Les trois seuils de détection de l'interface (BES 1, 2 et 3) sont superposés, traduisant une **interface homogène** correspondant à une vase très fluide de **type V**.

Séquence 2 : Au cours de cette séquence, qui dure 24 h (soit 2 cycles de marée), les premières vagues commencent à affecter la zone d'étude ($\tau_w = 0,4$ à $0,9$ N/m², avec $\tau_{sw} = 0,3$ N/m² et $\tau_{lw} = 0,6$ N/m²). Les vitesses de courant sont 27 % supérieures (0,23 m/s) à celles observées pour un marnage similaire par temps calme. Sous l'action de ces contraintes, les trois seuils de détection se séparent et l'**interface fluctue, entre - 5 et + 4 mm** autour de l'altitude de départ. Une partie de l'interface sédimentaire s'est diluée dans la colonne d'eau, entraînant une **turbidité proche de 100 mg/l**.

Séquence 3 : Cette séquence dure 24 h et la tempête est à son paroxysme au cours du 1^{er} cycle de marée de cette séquence (coefficient de marée de 44). Les vagues atteignent une hauteur significative de 1 m, provoquant des contraintes τ_w **comprises entre 1,3 et 1,6 N/m²**, celles correspondant aux vagues courtes étant plus importantes au cours de la première marée que celles des vagues longues ($\tau_{sw} = 0,8$ à $1,2$ N/m² et $\tau_{lw} = 0,5$ à $0,6$ N/m²). Les seuils de détection sont toujours séparés (**- 7 à + 4 mm autour de la hauteur de départ**). La turbidité augmente fortement et des concentrations en MES de l'ordre de **400 et 600 mg/l**, sont enregistrées. A la fin de cette séquence, **l'interface a été érodée de 2 mm**.

Séquence 4 : Cette séquence correspond à une période post-tempête qui dure 48 h. Les vents sont calmes, et les forçages hydrodynamiques deviennent faibles. Aucune dynamique sédimentaire n'est observée.

Séquence 5 : Les vents soufflent à 10-12 m/s en moyenne, de secteur Ouest à Sud-Ouest. Des vagues de 0,6 à 0,7 m se développent, engendrant des contraintes sur le fond autour de **0,5 N/m², avec des pics à 1 N/m²** en fin de période. Les contraintes de frottement des vagues (τ_w) de 1 N/m² sont accompagnées d'une turbidité d'environ **400 mg/l**. Les seuils restent groupés aux étales de marées basses, lorsque les vagues sont les moins importantes, alors que dès que les contraintes τ_{lw} atteignent 0,5 N/m², ils se séparent. Cette **séquence est relativement longue** et dure environ 72 h.

Séquence 6 : Cette période dure 36h. Les vents se renforcent fortement pour atteindre 14 m/s lors d'une VE (coefficient de marée de 71), engendrant sur la zone, des vagues de 0,7 à 1 m. Les contraintes τ_w atteignent rapidement des valeurs de **1,6 à 1,8 N/m²**, les vagues courtes représentant l'essentiel de ces contraintes ($\tau_{sw} = 1,2$ à $1,5$ N/m² et $\tau_{lw} = 0,2$ à $0,4$ N/m²). Les seuils de détection se séparent de nouveau et **fluctuent** sur une épaisseur de **7 à 8 mm**. Les turbidités enregistrées sur le site sont très élevées, d'environ **1000 mg/l**.

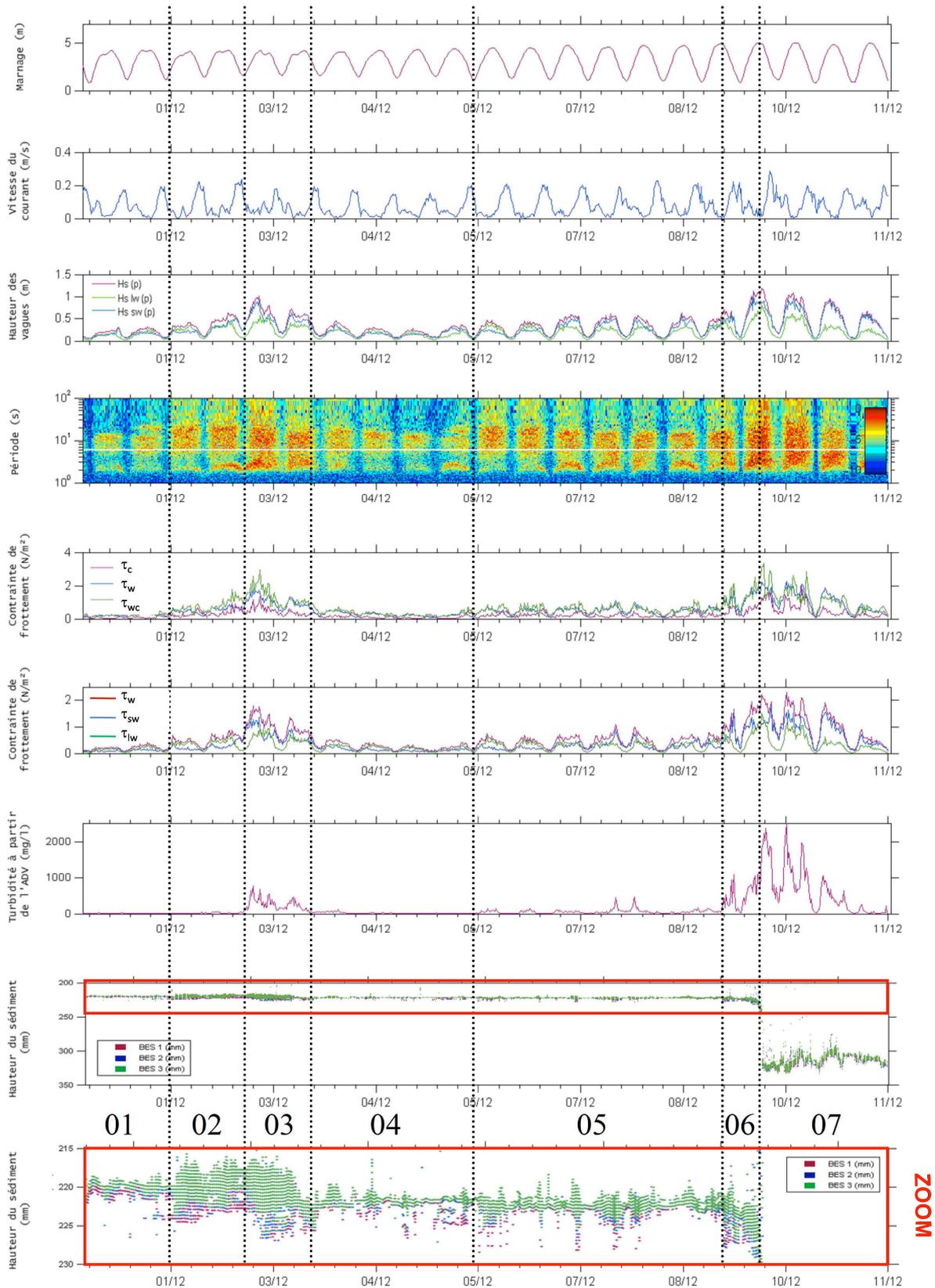


Figure VI-12 : Variations des paramètres hydrodynamiques (marnage, vitesse du courant, hauteurs des vagues, périodes et contraintes de frottement sur le fond des vagues) et sédimentaires (turbidité et hauteur du sédiment), entre le 30/11/07 et le 11/12/07

Séquence 7 : Au cours du flot de la deuxième marée de la séquence 6, les contraintes de frottement des vagues (τ_w) augmentent, rapidement, pour atteindre **2,2 N/m²**, avec des contraintes τ_{sw} identiques à celles enregistrées dans la précédente séquence. En revanche, les **vagues longues sont plus énergiques** et la contrainte τ_{lw} dépasse celle des vagues courtes, pour atteindre 1,5 N/m². **A partir de 2,2 N/m², une érosion brutale se produit**, affectant la totalité de l'interface vaseuse. Cette érosion a lieu à l'étale de marée haute, entraînant des turbidités supérieures à **2000 mg/l**. Toutefois, il apparaît que les vitesses de courants maximums mesurées sont 40 % supérieures (0,28 m/s) aux vitesses observées pour un marnage similaire, en période plus calme.

Cette érosion s'arrête sur une interface sablo-vaseuse. Or si les sables sont très mobiles, leur vitesse de chute est plus élevée que celle des particules fines, et ils se déplacent assez peu, ce qui expliquerait que l'interface sableuse semble « bloquer » les séquences d'érosions. Au cours des marées suivantes, les contraintes et les turbidités restent élevées. Cependant, les érosions deviennent très faibles et concernent un sédiment sableux. L'interface fluctue autour d'un nouveau niveau altimétrique, situé à environ – 100 mm par rapport à celui du début des événements.

VI-3.2.2. Observations à l'échelle des vagues

La figure suivante (fig. VI-13) montre la hauteur des vagues et la hauteur du sédiment au cours de 3 séquences. La première figure correspond à une séquence calme d'avant tempête (en rouge), tandis que la seconde et la troisième figures correspondent à deux séquences de tempête (en jaune et noir). La durée de ces séquences est de 150 secondes, de sorte qu'il est possible de voir les variations de la hauteur du sédiment à une échelle de temps très courte.

Lorsqu'il n'y a pas de vagues sur la zone, de petites variations des niveaux d'énergie acoustique de l'ALTUS (<1 –2 mm) du sédiment sont visibles, correspondant à la résolution de l'appareil de mesure.

En présence de vagues, les variations deviennent très importantes (6-8 mm) et très rapides. Il existe un mouvement oscillatoire de l'interface sédimentaire en relation avec la hauteur des vagues et leurs périodes : ces rapides variations peuvent affecter profondément la structure du sédiment et pourraient conduire à un phénomène de liquéfaction. Cependant, en l'absence d'information sur la pression à l'intérieur du sédiment, il est difficile de conclure en ce sens.

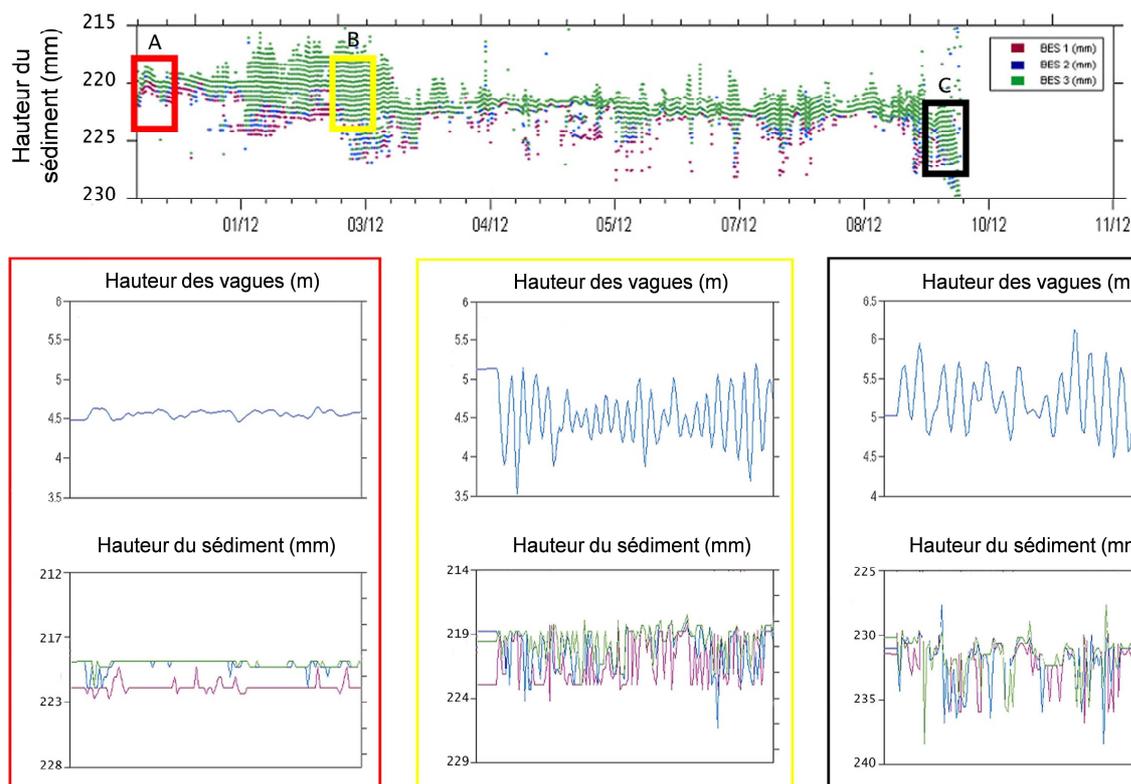


Figure VI-13 : Variations, sur une période de 150 secondes, des trois niveaux d'énergie acoustique de l'altimètre, permettant de déterminer la hauteur du sédiment, en fonction de la hauteur et de la fréquence des vagues sur le banc de Lamouroux, pour trois périodes distinctes : une période calme (en rouge), et deux périodes agitées (en jaune et noir)

A la vue de ces résultats, il est possible d'imaginer trois scénarii différents pour expliquer l'érosion en masse :

- 1) Lors de la seconde tempête, la contrainte de frottement des vagues a pu atteindre et dépasser un seuil critique d'érosion ($\tau_w > 2 \text{ N/m}^2$). Lorsque ce seuil est dépassé, le sédiment est alors érodé en masse.
- 2) Au cours de la seconde tempête, la participation des vagues longues à la contrainte de frottement des vagues était plus importante qu'au cours de la première tempête. Il est possible que ces vagues longues aient affecté plus profondément l'interface, provoquant alors cette érosion, du fait d'une énergie plus importante que celle produite par des vagues courtes.
- 3) Cette érosion peut être également le résultat de l'action continue des vagues sur le sédiment, au cours d'une certaine période (10 jours). La première tempête a pu commencer à déstabiliser une première fois la structure interne des sédiments (liquéfaction ?). Puis entre les deux tempêtes, des vagues ont continué d'agir sur l'interface, modifiant la cohésion du sédiment, par une sorte de pilonement continu. Ainsi, lorsque la seconde tempête a eu lieu, les sédiments de surface ont pu être plus facilement érodés.

VI-4. Evolution morpho-sédimentaire pluriannuelle du banc

VI-4.1. Sédimentation à moyen terme

Une petite carotte de 25 cm de long a été prélevée sous l'altimètre situé à l'extrémité d'une table ostréicole, en avril 2008. La radiographie de cette carotte (fig. VI-14) montre une alternance de niveaux sableux et de niveaux envasés. Les niveaux sableux (SQ1, SQ3 et SQ5) sont constitués, en moyenne, de 1 % d'argile, 5 % de silt et 94 % de sable, tandis que les niveaux vaseux (SQ2, SQ4 et SQ6) contiennent 10 % d'argile, 35 % de silt et 55 % de sable. Les deux premiers niveaux vaseux (SQ2 et SQ4) montrent une activité de Pb210 exc, indiquant un âge inférieur à 50 ans. Ces niveaux présentent des teneurs en eau faible (33-38 %), et des seuils d'écoulement extrêmement élevés (869-999 Pa) (tab. VI-2). Ce sont des vases très consolidées, liés à l'activité ostréicole estivale antérieure, et présentant des surfaces d'érosion à leur sommet. Les dépôts sableux correspondent à la sédimentation naturelle du banc, en période hivernale. La séquence SQ6 n'a pas pu être analysée, car elle n'était pas homogène.

Séquence	Argile (%)	Silt (%)	Sable (%)	Teneur en eau (%)	Seuil d'écoulement (Pa)
SQ2	9	33	28	36	999
SQ4	11	38	51	48	869

Tableau VI-2 : Caractéristiques granulométriques et rhéologiques des séquences de dépôts vaseux n°2 et n°4

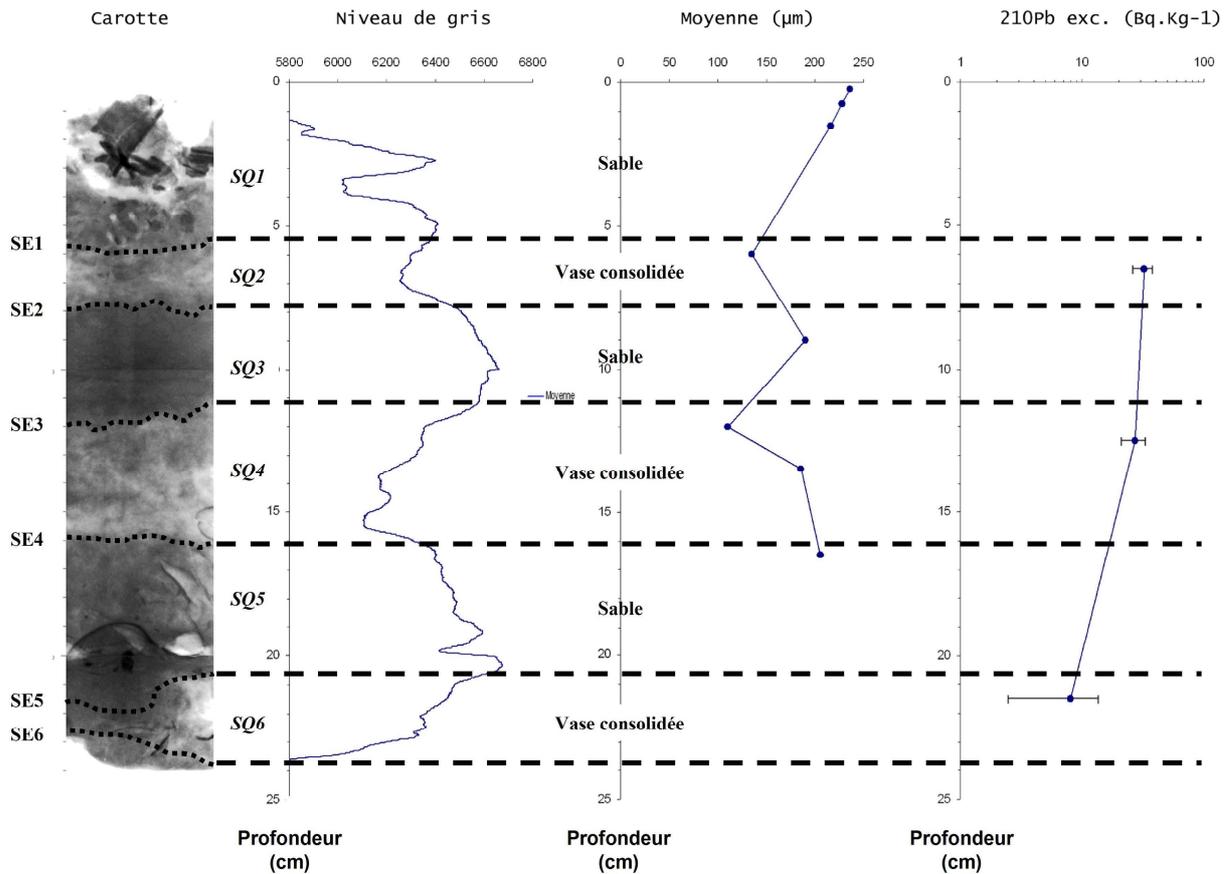


Figure VI-14 : Radiographie au rayon X, niveaux de gris, taille moyenne des particules et profil de l'activité du Pb210 en excès, sur le bas de la vasière

VI-4.2. Evolution des volumes sédimentaires entre 2005,2007 et 2008

Ce travail repose sur l'analyse de données bathymétriques (fig VI-15) à résolution fine (incertitude de 5 cm), réalisées à l'aide d'un GPS différentiel et d'un sondeur hydrographique. Ces mesures ont été effectuées par le laboratoire Ifremer-LERPC, d'une part au début du mois de mai pour les années 2005-2007, et d'autre part au cours du mois de février, pour l'année 2008, avant l'installation des tables ostréicoles. La méthode d'interpolation a été développée et décrite par Massard (2007), la zone d'étude recouvrant l'ensemble des installations ostréicoles. Pour chaque relevé bathymétrique, la stratégie d'échantillonnage a été rigoureusement la même, afin d'éviter les erreurs de calage bathymétrique.

A l'aide de l'outil « Spatial Analyst », présent dans le logiciel de SIG ArcMap 9.1, il est possible de traduire les différences altimétriques en volumes sédimentaires (fig VI-14), ce qui a permis d'appréhender les mouvements verticaux pluri-annuels et d'estimer des flux sédimentaires.

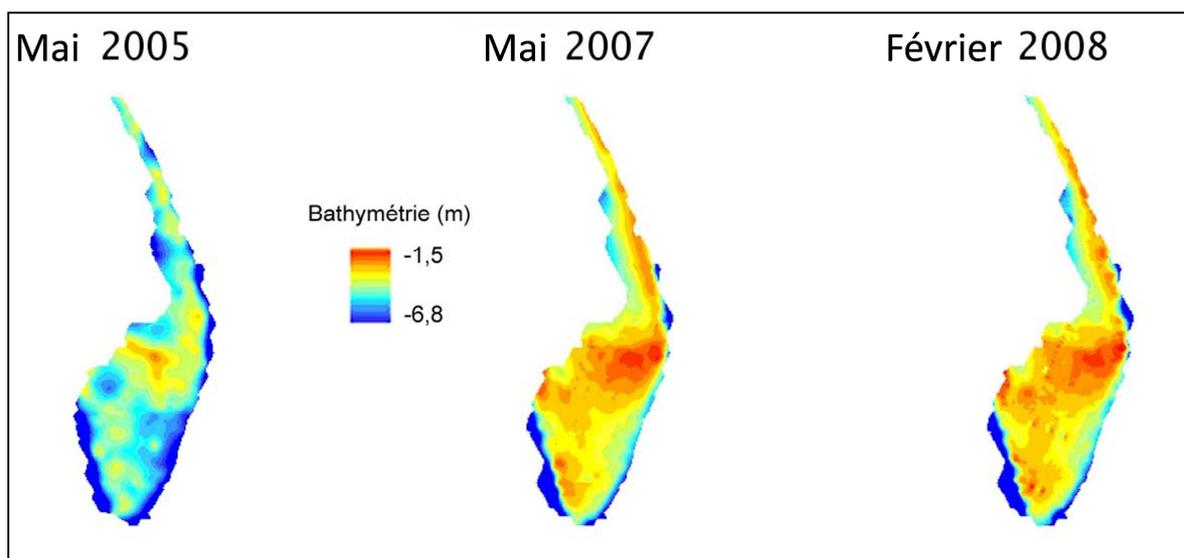
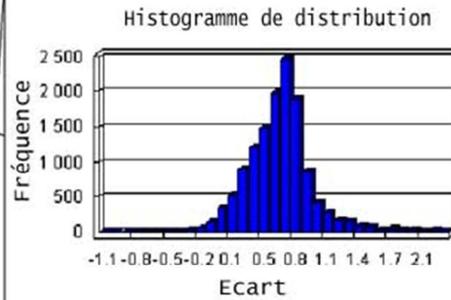
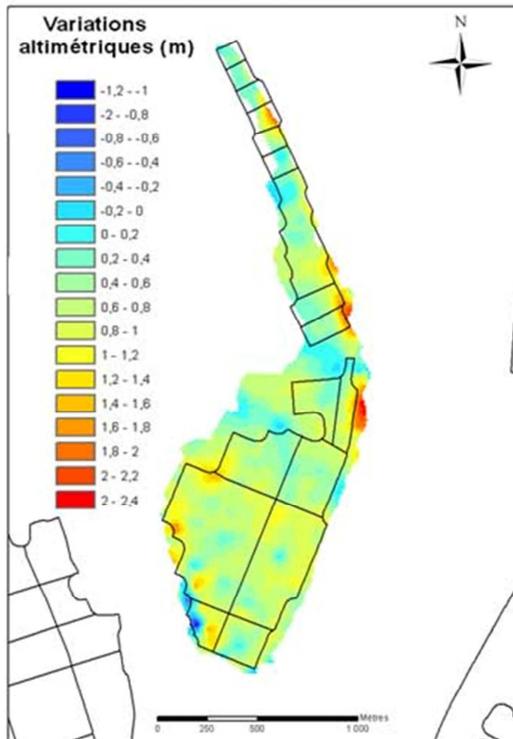


Figure VI-15 : Bathymétrie du banc de Lamouroux en 2005, 2007 et 2008

Entre mai 2005 et mai 2007, la totalité du banc a augmenté de volume (fig VI-16). En l'espace de deux ans, un volume de $885\,587\text{ m}^3$ de sédiments s'est déposé, avec des dépôts métriques dans la partie Ouest et sur la branche Nord du banc. Quelques zones sont stables, notamment dans la partie centrale, tandis que la bordure Sud-Ouest du banc a été érodée fortement (- 1 m). L'histogramme de distribution des écarts bathymétriques montre que les variations bathymétriques sont de - 1,1 m à + 2,30 m, avec un mode centré autour de + 0,80 m, l'élévation moyenne du banc étant de l'ordre de + 0,66 m.

Entre mai 2007 et février 2008, la morphologie du banc n'a quasiment pas évolué (fig. VI-16), avec un volume sédimentaire est légèrement négatif (volume estimé à $15\,648\text{ m}^3$ de matériaux érodés). Les zones d'accrétion se situent dans la zone centrale du banc, tandis que la partie Sud-Ouest est encore plus en situation d'érosion que lors de la période précédente (valeurs maximales : - 1,60 m). La branche Nord du banc montre à la fois des exhaussements et des érosions. Le haut de la partie centrale est plutôt stable, voire en légère érosion. L'analyse de la distribution des écarts bathymétriques confirme ce constat : ainsi les variations bathymétriques sont de - 1,70 m à + 0,80 m, avec un mode centré entre - 0,10 m et + 0,20 m, la valeur moyenne de la différence d'altitude étant de - 0,01 m (+/- 0,05 m), ce qui signifie que l'exhaussement du banc n'est pas significatif.

2005-2007



2007-2008

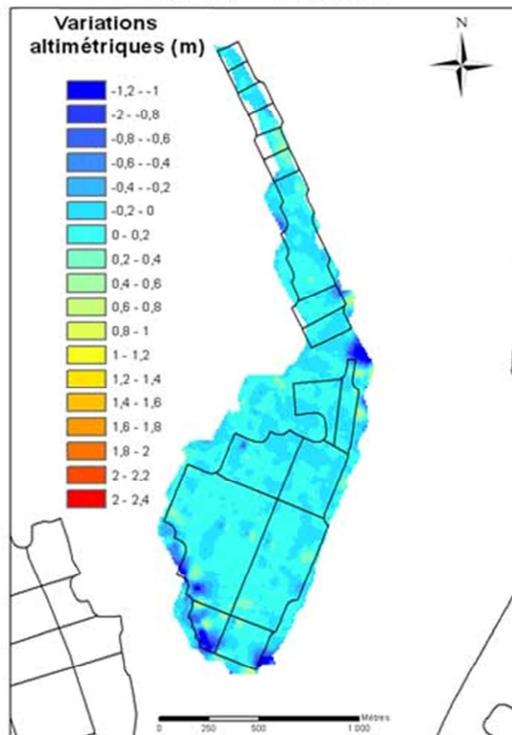
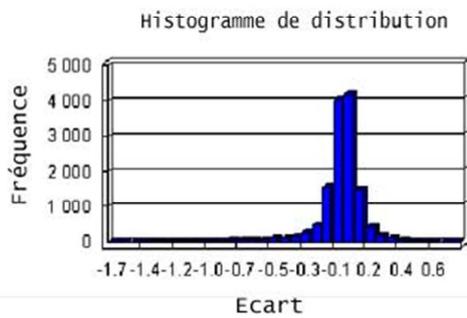


Figure VI-16 : Variations altimétriques et histogrammes de distribution des écarts bathymétriques du banc de Lamouroux, entre (a) mai 2005 et mai 2007 et (b) entre mai 2007 et février 2008

VI-4.3. Origine des évolutions morpho-sédimentaires

Les variations du volume sédimentaire du banc, sur une échelle de temps relativement courte, peuvent avoir trois origines : (i) l'ostréiculture, (ii) l'action des courants de marée ou (iii) l'action des vagues.

(i) L'ostréiculture

La contribution de l'ostréiculture ne peut pas expliquer entièrement l'exhaussement du banc, notamment entre mai 2005 et mai 2007. En effet, en prenant comme hypothèse un dépôt moyen de 10 cm sur le banc de Lamouroux (en prenant les mesures altimétriques de l'année 2007 comme référence), et sans tenir compte des phénomènes de tassement et d'érosion, il est possible d'estimer à environ 175 000 m³ le volume de dépôts liés à l'activité des huîtres entre mai 2005 et mai 2007. En admettant, qu'au cours des deux années, la hauteur des dépôts moyens ait doublé, ce qui paraît peu réaliste, un volume de sédiment moyen de l'ordre de 350 000 m³ peut être calculé, volume largement inférieur au volume total réellement estimé déposer au cours de la même sur cette période (885 587 m³).

(ii) Les courants de marée

Les vitesses maximales de courants réalisées en mortes-eaux et en vives-eaux, au niveau du site n°4, sont relativement faibles (tab. VI-3), engendrant des contraintes maximales de frottements des courants sur le fond faibles. Néanmoins, d'après le diagramme de Hjustrom, ces courants peuvent permettre le transport par charriage de particules sableuses. Ce qui est confirmé par la forme du banc de Lamouroux, qui correspond à ce que Hayes (1975) a défini comme étant un lobe de Flot.

ME/VE	Vitesse max (m/s)		Tau c max (N/m ²)		Turbidité max (mg/l)
	Flot	Jusant	Flot	Jusant	
ME	0,13	0,06	0,10	0,08	0
VE	0,35	0,18	0,40	0,20	10

Tableau VI-3 : Caractéristiques des courants de marée et turbidité associés sur le banc de Lamouroux (site n°4), en mortes-eaux (ME) et en vives-eaux (VE), en période calme

(iii) Les vagues

La figure VI-17 représente les hauteurs significatives simulées par le modèle Wavewatch III, au large de l'île d'Oléron, entre le mois de janvier 2005 et le mois d'avril 2008. Les périodes durant lesquelles ont été réalisés les différents relevés bathymétriques y sont représentées.

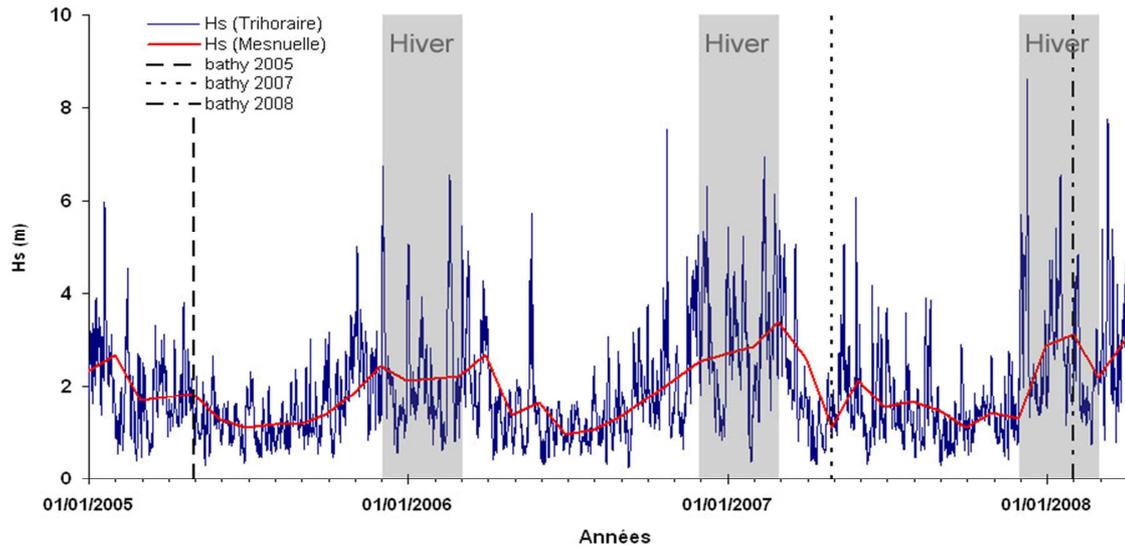


Figure VI-17 : Hauteurs significatives moyennes trihoraires (en bleu) et mensuelles (en rouge) des vagues, au large de l'île d'Oléron, données par le modèle WaveWatch III (NOAA), entre janvier 2005 et avril 2008, modifiées d'après Breilh (2008). Les dates de réalisation des relevés bathymétriques du banc sont signalées par des droites verticales en pointillés

Entre les périodes d'acquisition bathymétrique, les fréquences et les hauteurs maximales des fortes houles étaient très variables (tab.V-4). Ainsi l'hiver 2005-2006 est marqué par un faible régime de houle, avec peu de tempêtes. En revanche, l'hiver 2006-2007 et l'hiver 2007-2008 sont caractérisés par un régime de houle plus élevé.

	Hs moyen/mois maximale	Hs moyen/3h maximale	Nombre de fois (en hiver) où Hs > 6m ,avant une bathymétrie
Hiver 2006	2,42 à 2,67 m	6,70 m	3
Hiver 2007	2,83 à 3,37 m	7,55 m	7
Hiver 2008	2,88 à 3,10 m	8,61 m	3

Tableau VI-4 : Données caractéristiques des hauteurs significatives des vagues pour les hivers 2006, 2007 et 2008, d'après les données fournies par le modèle WaveWatch III (NOAA), au large de l'île d'Oléron

Le régime des houles semble donc jouer un rôle important dans les variations des volumes sédimentaires du banc. Cependant, la période, pendant laquelle les premières tempêtes hivernales affectent le banc, semble également significative. En examinant l'ordre chronologique des tempêtes entre l'hiver 2007 et l'hiver 2008, il apparaît que les premières tempêtes de l'hiver 2006-2007 sont plutôt moyennes, générant des vagues au large d'environ 4 à 5 m. En revanche, les premières tempêtes de l'hiver 2007-2008 sont très violentes, et ont généré des vagues de plus de 6 m.

En se basant sur les processus hydro-sédimentaires qui ont conduit aux érosions observées en décembre 2007 (cf. part. VI-3.2), il est possible d'avancer plusieurs scénarios pouvant expliquer les variations des volumes sédimentaires entre ces 3 hivers.

- ➔ Au début de l'hiver 2005-2006, les biodépôts n'ont vraisemblablement pas été érodés du fait de tempêtes de faibles ampleurs. Les courants de marée, associés aux vagues de ces tempêtes, ont pu alors transporter du sable, qui est venu s'accumuler sur les sédiments en place, le protégeant d'éventuelles érosions.
- ➔ Juste avant décembre 2007, de fréquentes houles de moyenne intensité, générées par des tempêtes, ont affecté la baie. Les tables ostréicoles n'étant pas encore enlevées, ces dernières ont pu protéger les biodépôts. De plus, les érosions en masse n'apparaissent que lorsque des événements très énergétiques affectent des dépôts relativement frais (cf. part. VI-3.2). Ces biodépôts ont donc pu être érodés partiellement, mais également rapidement recouvert de sable, tout comme durant l'hiver 2005-2006.
- ➔ L'hiver 2008 est marqué par deux tempêtes très violentes qui ont conduit à l'érosion d'une grande épaisseur de biodépôts sur le banc. Avant ces tempêtes, le temps était très calme, ce qui avait empêché les biodépôts d'être recouverts par des sables « protecteurs ».

Ainsi, l'ostréiculture, les courants de marée et les vagues participent, globalement, à l'évolution du banc de Lamouroux, mais dans des proportions variables. Les pratiques ostréicoles et les courants de marée constituant des variables à peu près constantes, la morphologie du banc est avant tout conditionnée par les vagues. Suivant le climat des vagues, la période à laquelle les premières tempêtes affectent la baie et suivant leur intensité, il apparaît donc trois possibilités d'évolution pour le banc :

Possibilité n°1	Régime de houle	Ostréiculture	Courant	Evolution
(ex : hiver 2005-2006)	faible peu d'érosion faible remise en suspension des sables	+ envasement	+ transport/accrétion	= Engraissement fort
Possibilité n°2	fort et 1er tempêtes moyennes érosion moyenne des biodépôts remise en suspension moyenne des sables	+ envasement	+ transport/accrétion	= Engraissement moyen
(ex : hiver 2006-2007)				
Possibilité n°3	fort et 1er tempêtes fortes érosion importante des biodépôts forte remise en suspension des sables	+ envasement	+ transport/accrétion	= Stabilisation
(ex : hiver 2007-2008)				

Tableau VI-5 : Evolution du banc de Lamouroux en fonction du régime de houle et de la puissance des vagues lors des premières tempêtes, de l'ostréiculture et des courants de marée

VI-5. Conclusions

Le suivi, selon plusieurs échelles spatio-temporelles, du banc de Lamouroux permet d'apprécier l'impact de l'ostréiculture, mais également celui des forçages hydrodynamiques, sur la sédimentation d'un banc sableux à vocation ostréicole.

Une grande partie de l'année, hors période d'exploitation des huîtres, la sédimentation sur le banc de Lamouroux est essentiellement sableuse et les mouvements de l'interface sont contrôlés uniquement par l'hydrodynamisme local. En période estivale, l'installation des

tables ostréicoles, ainsi que l'activité biologique des huîtres, entraînent un envasement et un exhaussement rapide de l'interface sédimentaire, sous la forme d'une auréole de déposition. La vitesse de l'envasement, sous table, est estimée à 20 mm/ mois, ce qui représente sur l'ensemble du banc un volume sédimentaire estimé de l'ordre de 85 000 m³ déposé en 5 mois, c'est à dire une masse comprise entre 53 000 et 62 000 tonnes de vases. Cette sédimentation fine s'arrête lorsque les huîtres sont enlevées du site.

Les violentes tempêtes hivernales peuvent déstabiliser les dépôts de vase, les vents forts modifiant la circulation des masses d'eau en augmentant de 27 à 40 % les vitesses maximales des courants, ce qui facilite la remise en suspension des sédiments.

Des érosions en masse d'une dizaine de centimètres, peuvent être observées, lorsque les contraintes de frottement des vagues (τ_w) dépassent 2 N/m². L'origine de ces érosions n'a pas été clairement identifiée : plusieurs hypothèses peuvent être avancées, comme une fatigue du matériau, le dépassement d'un seuil de contrainte, une action plus importante des vagues longues ou encore une liquéfaction sous-jacente.

Les tempêtes entraînent également un transport et une sédimentation sableuse plus ou moins importante. Ces sables, du fait d'une vitesse de chute plus élevée, vont recouvrir les dépôts de vase et empêcher l'érosion des niveaux de vase qu'ils recouvrent. Si ces dépôts sableux se produisent avant une tempête importante, les biodépôts peuvent être conservés partiellement, voire totalement.

La pression, qui est exercée par les différentes couches sédimentaires, accélère le tassement des couches de vase. De plus, l'eau interstitielle, contenue dans ces vases, va en être évacuée, d'autant plus facilement que ces vases sont encadrées par des niveaux sableux qui facilitent le drainage en dehors du banc.

Le volume sédimentaire du banc varie en fonction des années, ces variations étant en partie liées à la sédimentation et la conservation des dépôts de vase estivaux. Cependant, la principale responsable de ces variations est la sédimentation sableuse, dépendant des forçages liés à l'activité des vagues, les années pendant lesquelles les vagues sont moins fortes semblent provoquer un engraissement conséquent du banc. La période pendant laquelle les premières fortes tempêtes affectent le banc semble également être un élément déterminant dans l'importance des érosions des stocks de vase estivaux.

A l'échelle de plusieurs années, et avec la gestion actuelle des installations ostréicoles (installation saisonnière), la sédimentation sur le banc de Lamouroux est, avant tout, conditionnée par les variations des forçages hydrodynamiques, l'action des huîtres sur l'exhaussement n'intervenant donc que secondairement.

Partie VII : Applications du modèle hydro-sédimentaire SiAM-2DH en baie de Marennes-Oléron

VII-1. Introduction

La constitution d'une base de données conséquente sur les caractéristiques des vagues et sur l'évolution de la hauteur des sédiments, en différents points de la baie de Marennes-Oléron, a permis la modification de certaines variables du précédent paramétrage hydro-sédimentaire du modèle SiAM-2DH appliqué à la baie de Marennes-Oléron (Le Hir *et al.*, 2006).

SiAM-2DH rend compte de plusieurs phénomènes physiques concernant, notamment, la propagation de la marée, l'entraînement de la surface libre par le vent, la turbulence et le frottement sur le fond, il simule, également, le balancement des marées sur les zones intertidales ainsi que les mécanismes de transports sédimentaires (érosion, dépôt) concernant les vases, les sables et les mélanges de sables et de vases (Le Hir *et al.*, 2009; Waeles, 2005; Waeles *et al.*, 2008).

Une simulation représentative de la période d'étude hydro-sédimentaire, intégrant des conditions aux limites réalistes et utilisant un nouveau paramétrage sédimentaire, est réalisée de façon à évaluer la capacité du modèle à reproduire, les contraintes de cisaillements des vagues sur le fond, et la turbidité près du fond sédimentaire. Ensuite, la couverture sédimentaire simulée de la baie est confrontée à celle observée, en été et en hiver, lors de la campagne sédimentaire (*cf.* part. IV-4).

Enfin, les conséquences de la présence des zones ostréicoles, sur la dynamique sédimentaire (fraction vaseuse de surface, et zones en érosions/dépôts) de la baie, est discutée, en testant des scénarios incluant ou non la présence d'huîtres dans le système.

VII-2. Validation du modèle de houle : capacité du modèle à reproduire les contraintes de fond induites par les vagues

Les valeurs des contraintes de frottement de vagues sur le fond (τ_w), calculées par le modèle de houle, sont comparées avec celles déterminées à partir des mesures de pression enregistrées en 2007-2008 par les altimètres *in situ* (ALTUS). Les stations retenues caractérisent des environnements très différents les uns des autres. Ces environnements ne présentent pas toujours les mêmes fenêtres d'exposition aux vagues et aux vents (tab. VII-1). Par exemple, le banc de Lamouroux (site n°4), situé au milieu de la partie Nord de la baie, présente une large exposition aux vents (W, NW, N, NE, E, SE, S), alors qu'un site comme les Doux bas (site n°3) possède une fenêtre d'exposition directe plus réduite (NW, N, NE, E).

Ces différentes configurations vont permettre de pointer les éventuels problèmes de reproduction des contraintes des vagues sur le fond, notamment en fonction de la direction du vent. Dans cette partie, les tensions de cisaillement simulées par le modèle de vague seront analysées et comparées aux contraintes calculées à partir des mesures ALTUS, sur la période 2007-2008.

Puis dans une seconde partie, la sensibilité du modèle à la direction du vent (le modèle calculant les vagues à partir du vent local) sera étudiée pour chaque station, sur des événements tempétueux d'une durée de quelques jours.

L'utilisation des données de l'ensemble des altimètres déployés (du 04/04/07 au 04/04/08) permet de réaliser une validation pertinente, du fait de la répartition de ces appareils dans la baie. Cette validation a porté sur l'estimation de la contrainte de cisaillement, qui suppose une hypothèse sur la rugosité de peau prise en compte.

Comme dans le modèle, la rugosité de peau utilisée pour calculer les contraintes de cisaillement à partir des hauteurs de vagues est la même en toute station : ainsi, les contraintes de frottement des vagues sur le fond, déterminées à partir des mesures ALTUS, ont toutes été recalculées en prenant un $z_0 = 0,2$ mm correspondant à des vases selon Soulsby (1997).

Site	Exposition aux vents et vagues							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Boyardville (site n°1)	x	x	x					
Les Doux haut (site n°2)	x	x	x					x
Les Doux bas (site n°3)	x	x	x					x
Banc de Lamouroux (site n°4)	x	x	x	x	x		x	x
Brouage bas (site n°5)						x	x	x
Brouage haut (site n°6)						x	x	x
Banc de Perquis (site n°7)							x	x

Tableau VII-1 : Fenêtres d'exposition aux vents et aux vagues (houles et clapots), des différents sites instrumentés

VII-2.1. Variabilité spatiale des contraintes de cisaillement des vagues sur le fond simulées

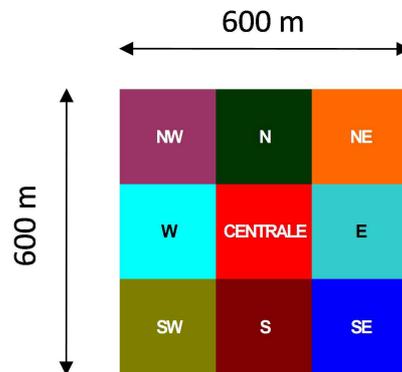


Figure VII-1 : Structuration cardinale de la zone de comparaison

La figure VII-2 représente l'évolution des contraintes de cisaillement maximales sur le fond des vagues, pour plusieurs mailles dans le secteur du site n°3 (Fig. VII-1), sur une période de 7 jours, correspondant aux tempêtes de début décembre 2007. Ces mailles présentent de légères variations bathymétriques. La valeur de τ_w montre une grande variabilité. Une autre illustration de ce phénomène est fournie en la figure VII-3, qui représente une carte des contraintes maximales de cisaillement des vagues atteintes au cours des deux tempêtes de décembre 2007. Ces variations peuvent être imputables aux différences bathymétriques, qui peuvent exister entre chaque maille.

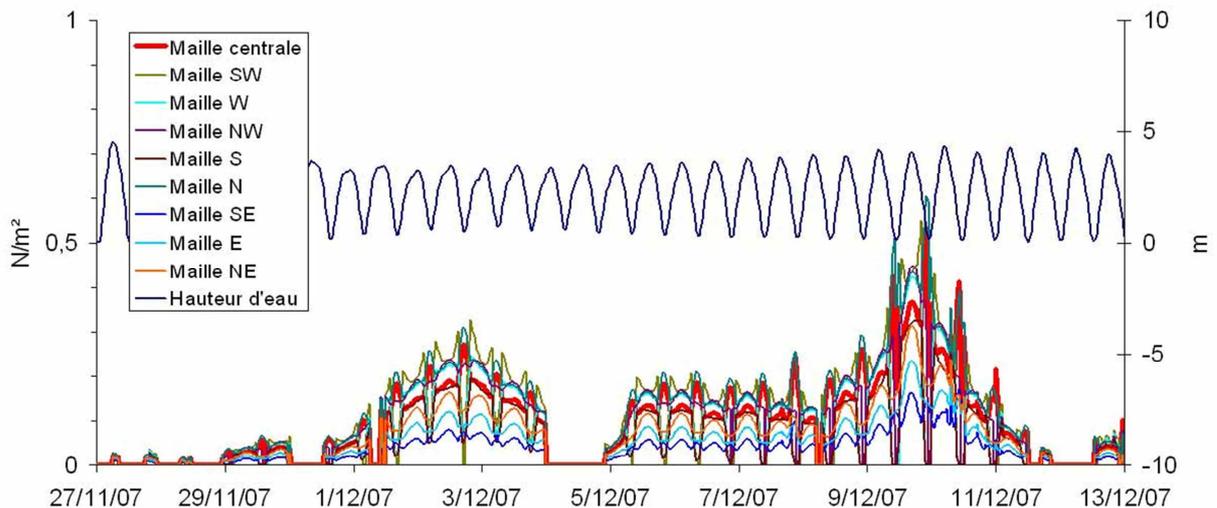


Figure VII-2 : Contraintes maximales de cisaillement des vagues sur le fond simulées, en plusieurs mailles autour du site n°3, pour la période couvrant les deux tempêtes de décembre 2007 (entre le 02 et le 09 décembre). Vent de secteur Sud-Ouest à Ouest, soufflant à 19-20 m/s

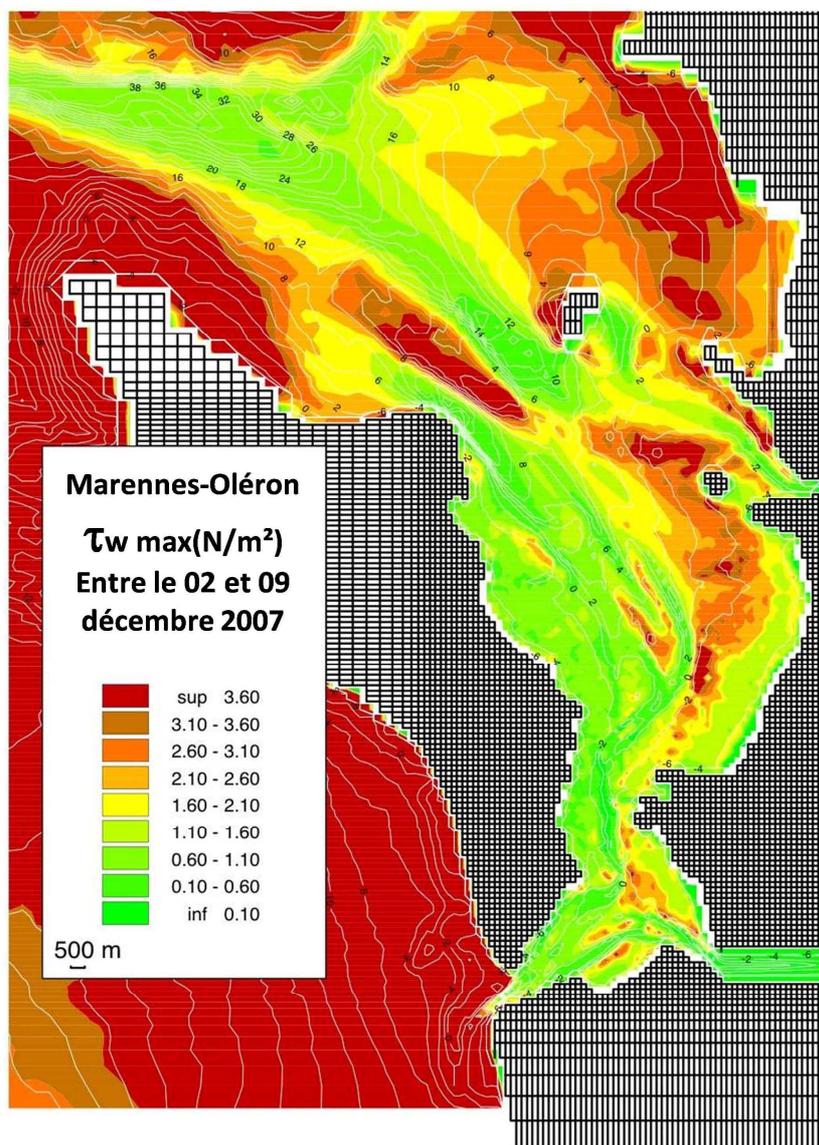


Figure VII-3 : Distribution des contraintes de cisaillement maximales sur le fond induites par les vagues, pour la période couvrant les deux tempêtes de décembre 2007 (entre le 02 et le 09 décembre). Vent de secteur Sud-Ouest à Ouest, soufflant à 19-20 m/s

VII-2.2. Comparaison des contraintes de fond induites par les vagues

Trois cas de figure sont présentés, le premier correspondant à une comparaison sur l'ensemble de la période simulée (400 jours), et les deux autres correspondant à deux périodes, plus courtes, (6 et 14 jours), en condition de tempête.

VII-2.2.1. Comparaison sur une période de 12 mois

La figure VII-4 représente les tensions de cisaillement des vagues (τ_w) calculées à partir des altimètres, et celles déterminées par le modèle pour les sites n°1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7, entre le 8 avril 2007 et le 4 avril 2008.

Dans la plupart des cas (site n°1, 3, et 4), le modèle reproduit les contraintes de frottement des vagues sur le fond (τ_w), qui sont du même ordre de grandeur que celles déterminées à partir des mesures. Les principaux évènements de tempêtes sont bien reproduits, à la fois en amplitudes de variation et en valeurs moyennes. Les meilleurs résultats sont obtenus pour le site n°4 (Banc de Lamouroux). Cependant, il existe quelques différences entre les résultats du modèle et les valeurs mesurées.

Pour le site n°2 (Les Doux haut), les contraintes τ_w calculées par le modèle sont 2 à 3 fois supérieures aux mesures *in situ* effectuées au cours de la période estivale, alors que ce n'est pas le cas le reste de l'année. Les données *in-situ* ont montré pendant l'été, les contraintes de vagues sur le fond étaient quasiment nulles, en dépit d'une certaine agitation dans la baie (cf. part. V.2.1). Or nous avons vu dans la partie V-2.4.2., qu'un herbier se développait sur cette zone entre le mois de juin et le mois d'octobre, avec une biomasse maximale au cœur de l'été. Cet herbier est susceptible d'affecter la propagation des vagues, en atténuant leur hauteur et en modifiant la longueur de rugosité de la zone. Dans le modèle, aucune modification de la rugosité, rendant compte de la présence d'herbier, n'a été réalisée. Ceci peut expliquer le fait que les tensions de cisaillement calculées par le modèle soient plus fortes durant cette partie de l'année.

Sur le site n°5 (Brouage bas), les contraintes sont globalement correctes. Cependant, lors de forts coups de vent, le modèle peut avoir tendance à prédire une contrainte plus forte que celle mesurée.

Sur le haut de la vasière (site n°6), le modèle tend à reconstituer une contrainte plus faible, et certains évènements ne sont pas reproduits, comme ceux début mai 2007, ou encore celui du 06 août 2007.

Au niveau du banc de Perquis (site n°7), les contraintes simulées sont, la plupart du temps, concordantes avec les observations. Cependant, en hiver, de nombreuses différences apparaissent, et le modèle conduit à sous estimer les contraintes de cisaillement des vagues sur le fond, dans cette zone.

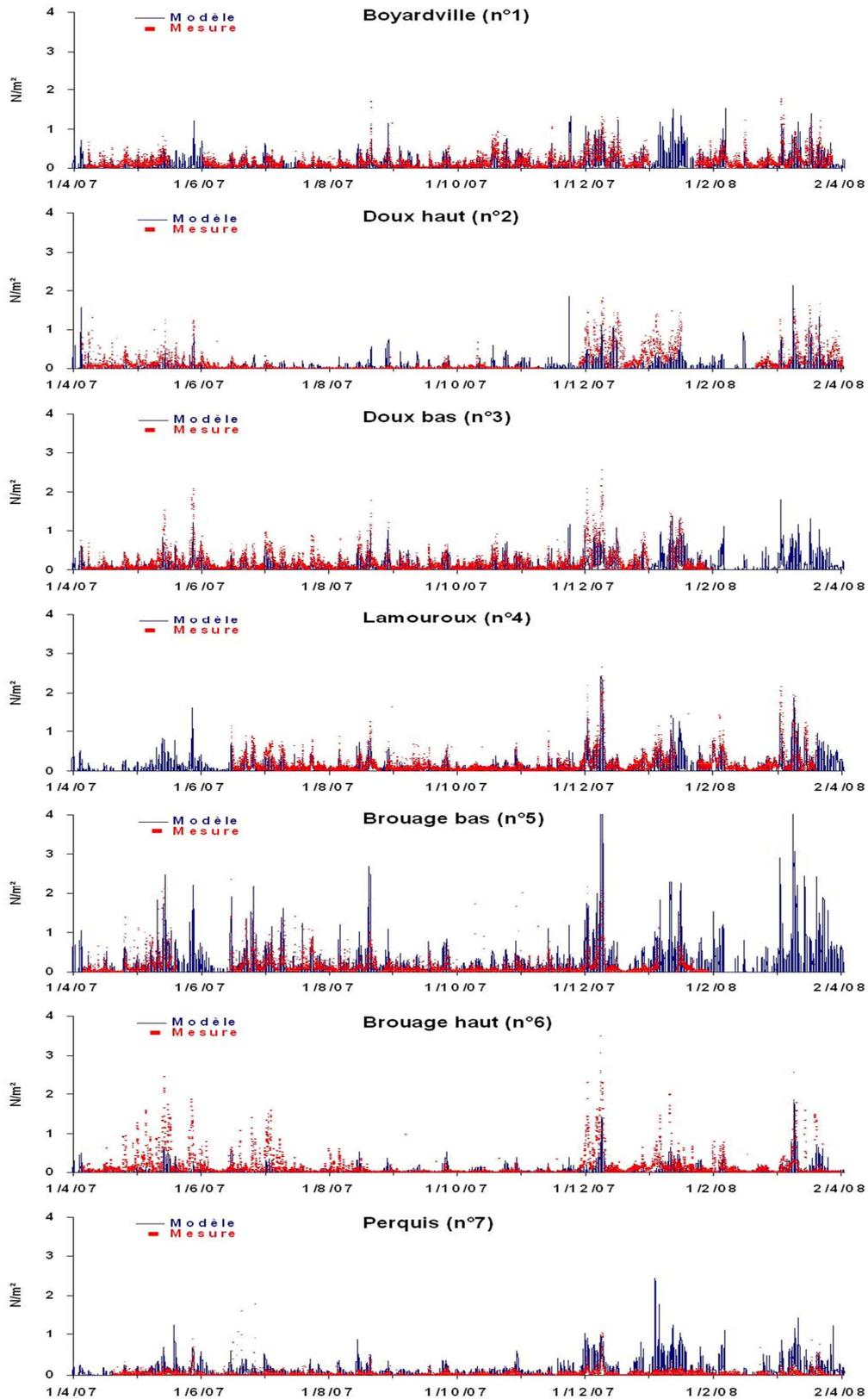


Figure VII-4 : Comparaison entre la contrainte de frottement des vagues sur le fond simulées (en rouge) et celle mesurées (en bleu) à partir des ALTUS, entre le 01/04/07 et le 01/04/08

VII-2.2.2. Comparaison sur des événements tempétueux caractéristiques

Deux périodes caractéristiques ont été choisies pour cette comparaison, durant lesquelles le vent a soufflé relativement fort (vitesse moyenne > 16 m/s), et dans des directions différentes.

VII-2.2.2.a. Première période (11/05/07 au 17/05/07)

NB : Pour cet exemple, aucune donnée n'était disponible pour le site n°4 (Banc de Lamouroux), car l'altimètre n'était pas encore installé.

Cette tempête est caractérisée par un coup de vent qui arrive par le secteur Sud-est, dans la nuit du 12 au 13 mai 2007 (fig. VII-5). Deux pics de vents sont enregistrés, avec des vitesses moyennes de 16-17 m/s, pour des directions de vent de secteur Sud-Ouest. Ensuite, le vent prend une direction Ouest à Sud-Ouest. Cette tempête s'est formée rapidement dans le golfe de Gascogne, relativement près des côtes, avec une houle locale.

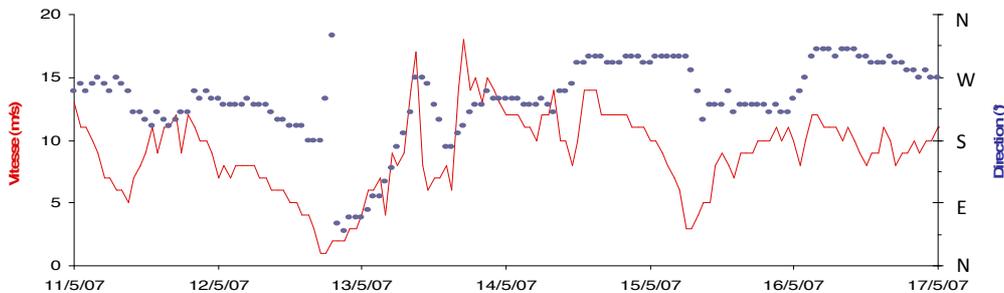


Figure VII-5 : Vitesse moyenne tri-horaire (en rouge) et direction du vent (en bleu), au niveau du phare de Chassiron, entre le 11/05/07 et le 17/05/07

La figure VII-6 représente la comparaison entre les contraintes de cisaillement des vagues sur le fond simulées par le modèle et celles calculées, au niveau des différents sites instrumentés.

A Boyardville (site n°1), les contraintes simulées sont du même ordre de grandeur que celles calculées, avec toutefois l'absence de contraintes, au moment où le vent est Sud-ouest (du 11/05/07 jusqu'au 14/05/07, en milieu de journée) ; alors qu'entre le 14/05/07, et le 15/05/07, lorsque le vent prend une direction Ouest, avec une vitesse de 14 m/s, le modèle simule une contrainte de cisaillement voisine de celle déduite des mesures.

Sur le haut des Doux (site n°2), le modèle sous-estime également les vagues pour des vents de Sud-ouest, mais l'écart entre la simulation et la mesure reste acceptable.

Concernant les Doux bas (site n°3), le modèle reproduit difficilement les contraintes de cisaillement des vagues sur le fond, quelle que soit la direction du vent. Les contraintes maximales calculées à partir des données sont nettement plus fortes. Selon les mesures, des vagues générées par un vent de secteur Sud-ouest arrivent jusque dans cette partie de la baie, avec une énergie qui provoquerait des contraintes sur le fond supérieures à 1 N/m². La

propagation des vagues dans cette zone, notamment par vent de Sud-ouest, n'est pas bien prise en compte dans le modèle.

Sur le bas de la vasière de Brouage (site n°5), les amplitudes et les valeurs moyennes des contraintes de cisaillement des vagues sur le fond sont correctement reproduites pour des vents de Sud-ouest à Ouest. Cependant, il apparaît, de temps en temps, un décalage entre les pics de contraintes simulées et les pics des contraintes calculées. Il semble que dans certains cas, la maille choisie « découvre » à l'étale de marée basse, ce qui n'était pas le cas dans la réalité.

Le haut de la vasière (site n°6) subit peu l'influence des vagues générées par des vents moyens (<13 m/s) de Sud-ouest, d'après les mesures. Le modèle s'accorde bien ici, avec les mesures. Lorsque le vent forçait par le Sud-ouest le 14/05, les contraintes de cisaillement du modèle (τ_w) restent plus faibles que celles déduites des mesures ALTUS.

Quant au banc de Perquis (site n°7), lors de cet épisode tempétueux (tempête avec un vent de Sud-Ouest soutenu), l'impact des vagues sur ce site est quasiment nul. Le modèle reproduit une contrainte de fond très faible, du même ordre de grandeur que celles déduites des observations.

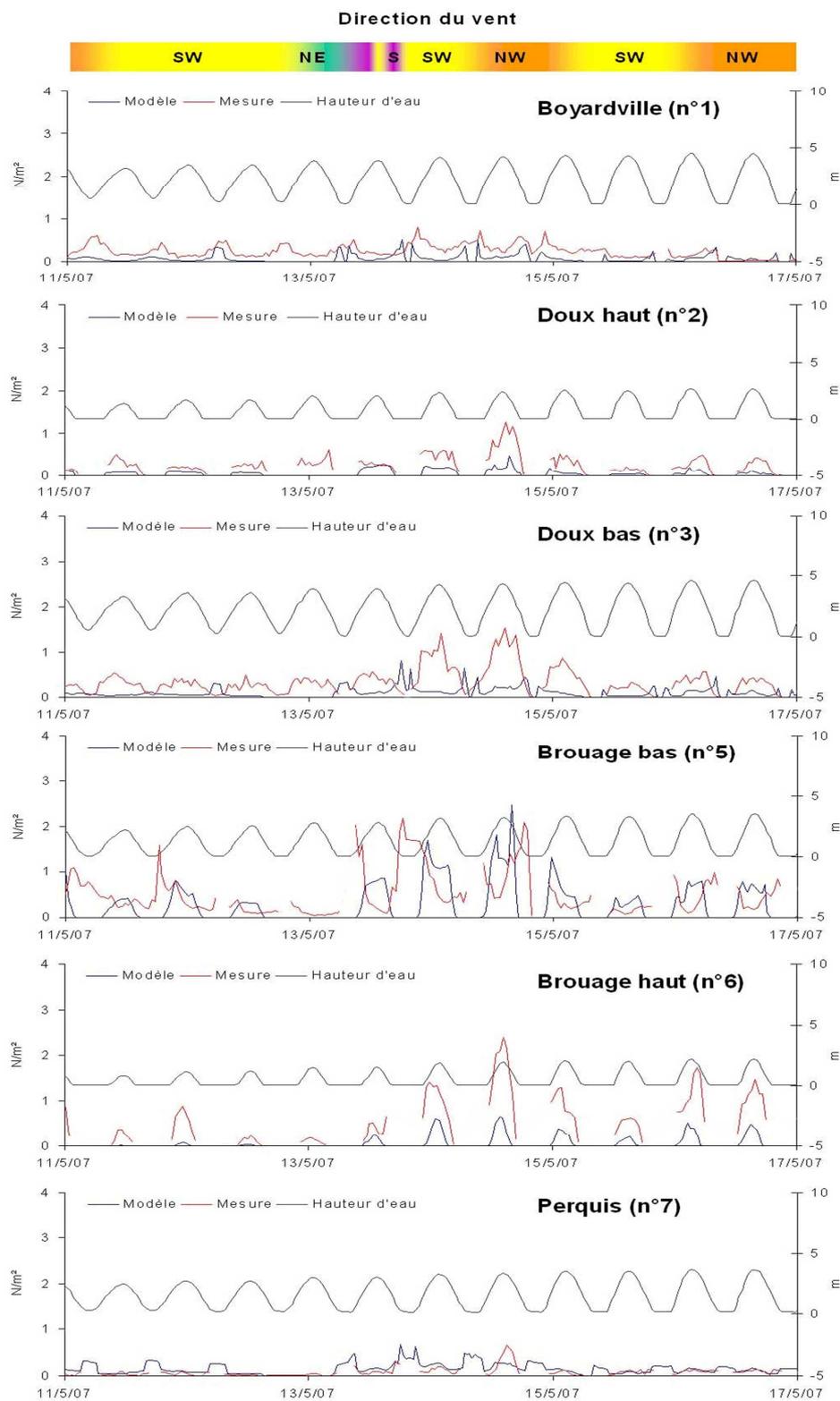


Figure VII-6 : Comparaison entre la contrainte de frottement des vagues sur le fond simulée (en rouge) et celle calculée (en bleu) à partir des ALTUS (période du 11/05/07 au 17/05/07), pour le site n°1, 2, 3, 5, 6 et pour le site n°7

VII-2.2.2.b. Seconde période (30/11/07 au 13/12/07)

Au cours de cette période, deux très grosses tempêtes ont frappé la baie de Marennes-Oléron. Les vents ont soufflé, fortement, aux abords des côtes (19-20 m/s en moyenne), de secteur Sud-Ouest pour la première tempête, et Ouest, pour la seconde (fig. VII-7) ; à la fin de cette période, le vent a fini par prendre une direction Nord à Nord-Est. Ces tempêtes ont également engendré de très fortes vagues, avec des périodes très longues (*cf.* part. VI-3.). Elles nous permettent de tester la réponse du modèle, pour des vents de secteur Ouest à Nord-Est, mais, également, d'analyser si le modèle reproduit correctement l'influence des grandes houles.

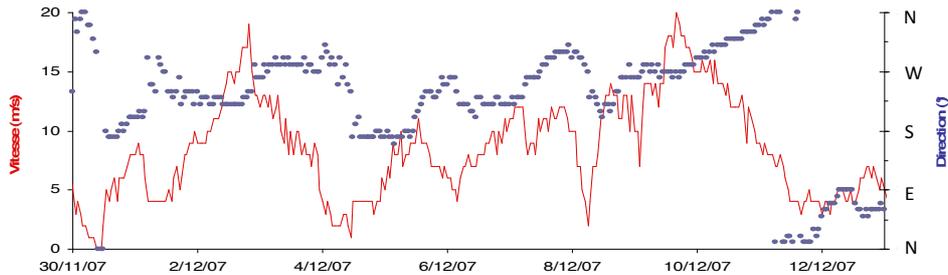


Figure VII-7 : Vitesse moyenne (tri-horaire) et direction du vent, enregistrées au phare de Chassiron, entre le 30/11/07 et le 13/12/07

Pour le site n°1, le modèle « répond » qualitativement bien aux forçages de mer de vent, mais sous-estime légèrement les τ_w (fig. VII-8), par vent de secteur Ouest à Nord-Est.

Pour le site des Doux haut (site n°2), le modèle reproduit plutôt correctement les variations, mais il sous-estime d'un facteur 1,5 à 2 les τ_w lorsque le vent est au secteur Sud-Ouest. Les valeurs simulées sont, de nouveau, correctes, lorsque le vent bascule aux secteurs Ouest à Nord.

Sur le site n°3 (Doux bas), les τ_w simulées sont encore peu conformes, quelles que soient les directions des vents.

Sur le banc de Lamouroux (site n°4), le modèle reproduit bien les τ_w , quelle que soit la direction du vent. Les amplitudes, et les valeurs moyennes sont cohérentes avec les calculs.

Pour le site n°5, Les τ_w sont nettement plus fortes que celles calculées. Les amplitudes de variations sont correctes, mais les valeurs moyennes sont souvent exagérées.

Sur le haut de la vasière (site n°6), les amplitudes simulées sont respectées par vent d'Ouest, mais pas par vent de Sud-Ouest. D'une manière générale, les contraintes restent sous-estimées.

Sur le banc de Perquis (site n°7), enfin, le modèle reproduit plutôt correctement les contraintes calculées, quelle que soit la direction du vent. En revanche, il apparaît un problème de découvrage de la maille. Dans le modèle, il semble que la maille choisie ne découvre pas durant la période observée, ce qui provoque une augmentation des contraintes de frottement des vagues sur le fond lors des étales de marée basse.

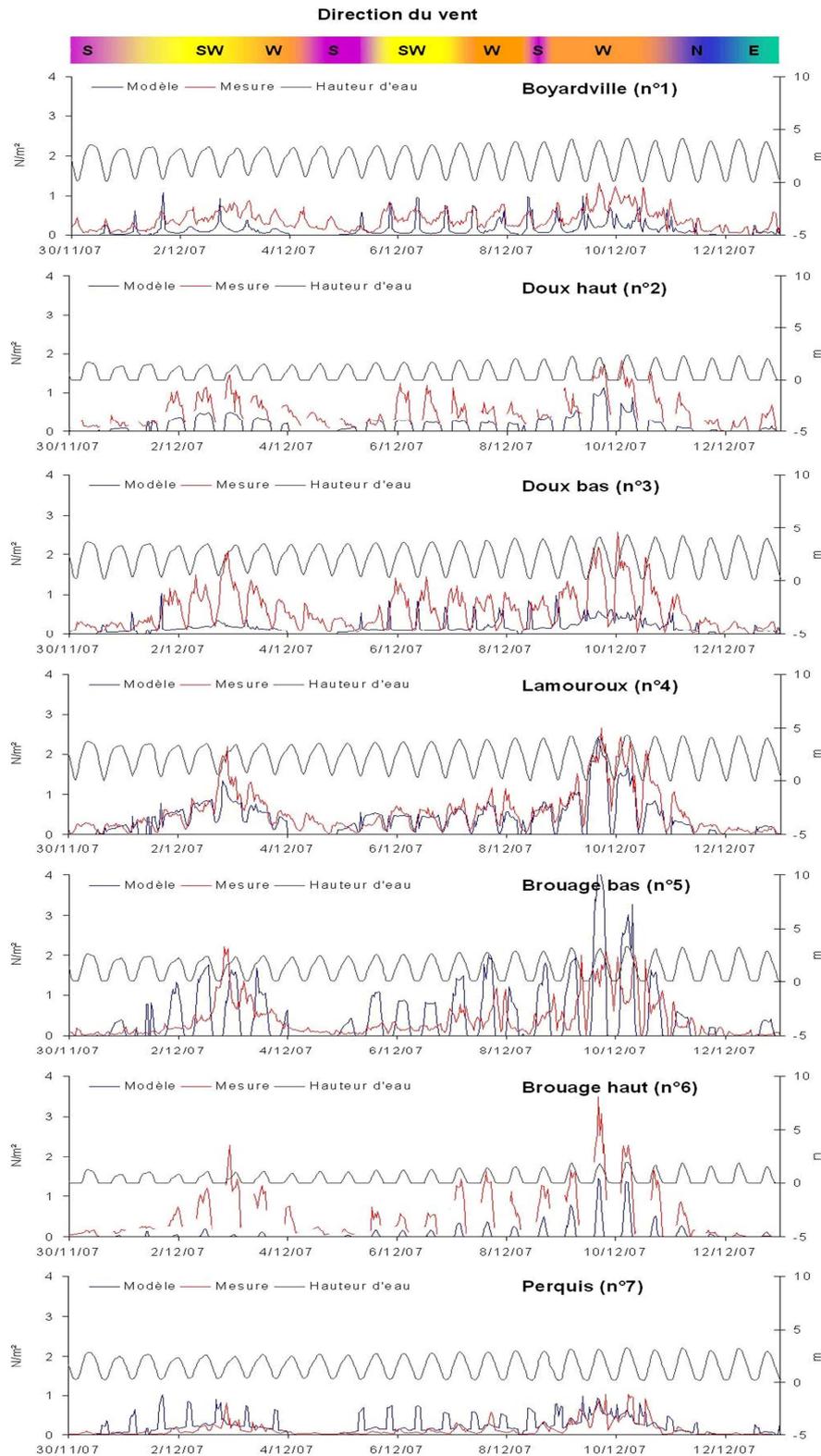


Figure VII-8 : Comparaison entre la contrainte de frottement des vagues sur le fond simulée (en rouge) et celle calculée (en bleu) à partir des ALTUS (période du 30/11/07 au 13/12/07), pour le site n°1 à 7

VII-2.3. Synthèse

Malgré une tendance, pour certaines configurations de vent, à une sous-évaluation des contraintes de frottements des vagues sur le fond, il apparaît que le modèle est capable de reproduire de manière acceptable ces contraintes dans l'ensemble des stations de mesure et pour l'ensemble de la période étudiée. Ainsi les forçages simulés suivent-ils de façon réaliste les forçages réels observés dans le bassin de Marennes-Oléron.

L'analyse détaillée de l'influence de la direction du vent, sur la reproduction de la contrainte de cisaillement des vagues, montre cependant un certain nombre de problèmes. Les contraintes sont relativement mal reproduites pour des vents de direction SW, notamment sur le site n°1, 3 et 6. Par des vents de secteur S, les contraintes sont un peu mieux reproduites. En revanche, par des vents de directions W à NW, le modèle reproduit plutôt bien les contraintes. Généralement, les contraintes sont sous-évaluées par rapport à celles calculées, sauf pour la partie centrale (Lamouroux et Brouage bas). Le modèle simule bien les effets des vagues dans la partie centrale de la baie. Les secteurs de la baie s'écartant le plus des observations sont le secteur des Doux bas, et également les parties hautes des estrans (Doux haut et Brouage haut).

La qualité moyenne des simulations peut être attribuable à plusieurs facteurs tels que : (1) la forte instationnarité (non simulée) des vagues lors de l'évolution du vent, (2) le changement d'état du fond sédimentaire (changement de rugosité, voire effet de liquéfaction du fond se traduisant par un amortissement des vagues), (3) un effet excessif des houles du large simulées (en début de période par exemple si cette houle du large a en réalité une orientation très différente de la direction ouest supposée dans le modèle), (4) les écarts bathymétriques (influençant les temps d'émersion) qui jouent un rôle dans le calcul de la contrainte de fond. Les contraintes de cisaillement des vagues simulées sont souvent plus faibles en haut des estrans : cela peut résulter d'une surestimation des frottements sur le fond dans la modélisation des vagues, qui rappelons-le était déjà réalisée avant la présente validation des résultats.

VII-3. Calibrage et validation du modèle sédimentaire

VII-3.1. Calibrage du modèle de transport en suspension

Dans cette étape, le modèle a été calibré afin de simuler des concentrations de matières en suspension (MES) près du fond les plus réalistes possible. Un premier calibrage avait été réalisé par P. le Hir dans le cadre de l'étude pour une gestion dynamique des sédiments sur les côtes du bassin de Marennes-Oléron et le pertuis de Maumusson, pour le Conseil Général de la Charente-Maritime (CG17), en 2006 (Le Hir et al., 2006). Ce calibrage était basé sur des données hétéroclites, de courte durée, issues de prélèvements par pompage, mais également de mesures en continu effectuées avec des sondes de turbidité (campagne INTRMUD, 2000). A l'époque, le calibrage avait été considéré comme « acceptable », tout en précisant qu'il devrait être reconduit dès que des enregistrements de turbidité de plus longue durée seraient disponibles.

Dans notre étude, un nouveau calibrage du modèle sédimentaire a été réalisé, à partir des données de turbidité réalisées à haute fréquence et en continu, entre 2007 et 2008, en trois points de la baie : les Doux bas (site n°3), à Brouage bas (site n°5), et sur le banc d’Agnas de la baie. La durée de la simulation est de 400 jours, couvrant la période comprise entre le 1^{er} mars 2007 et le 4 avril 2008. Il a été décidé de modifier trois paramètres hydro-sédimentaires :

- la constante d'érosion a ainsi été légèrement augmentée, passant de 0,0001 à 0,00015 kg.m⁻².s⁻¹, pour augmenter les flux d'érosions des sédiments cohésifs, et donc la turbidité.
- la vitesse de chute des particules a également été augmentée, afin de permettre une décantation plus rapide des matières en suspension.
- la concentration en vase, à la limite marine du domaine, a été prise en compte, afin d'éviter la perte de matières en suspension dans le système, pour des simulations de longues durée, et, également, par soucis de reproduire les apports sédimentaires issus de l'estuaire de la Gironde.

Les principaux paramètres hydro-sédimentaires retenus sont les suivants :

Option	Etude précédente (Le Hir, 2006)	Modifications apportées
Constante d'érosion E0mud (kg.m-2.s-1)	0.0001	0.00015
Puissance de l'excès de cisaillement (n _m)	1	1
Contrainte critique d'érosion t _{em} (Pa)	0.2.10 ⁻⁸ C _{relvase} ²	0.2.10 ⁻⁸ C _{relvase} ²
Concentration vase à la limite marine (kg.m-3)	0	0.005
Concentration vase en Charente amont (kg.m-3)	0.06	0.06
Vitesse de chute min et max (mm/s)	0.1 à 1	0.3 à 3
Contrainte critique de dépôt (Pa)	10 Pa	10 Pa

Tableau VII-2 : Récapitulatif des principaux paramètres hydro-sédimentaires modifiés, par rapport à l'étude réalisée par le Hir (2006), dans le modèle sédimentaire SiAM-2DH

Un autre point à considérer est l'expression de la contrainte critique d'érosion (τ_{ce}) en fonction de la fraction relative de vase contenue dans les couches superficielles ($C_{cr.mud.fr.}$). Initialement dans le modèle adopté cette relation est empirique. Or l'étude rhéophysique a permis de définir une relation basée sur l'expérimentation entre le seuil d'écoulement (τ_y) et la concentration de vase.

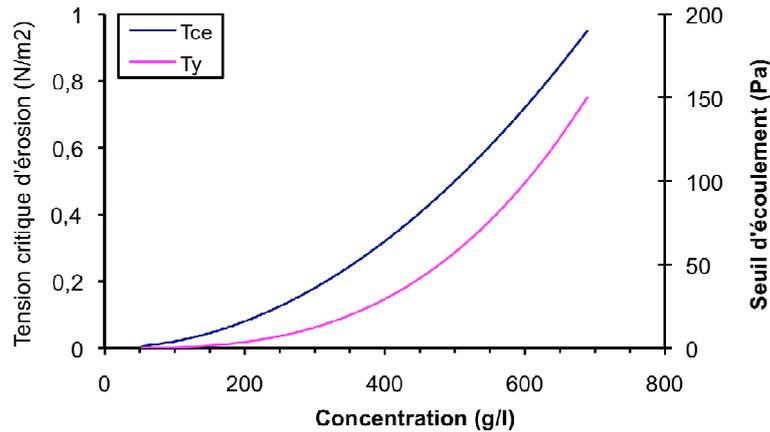


Figure VII-9 : Relations entre la contrainte critique d'érosion (τ_{ce}) d'une part, le seuil d'écoulement (τ_y) d'autre part et la concentration relative de vase (C) dans le sédiment superficiel

La figure VII-9 montre que la contrainte critique d'érosion utilisée, avant cette étude (Le Hir et al., 2006), dans le modèle SiAM-2DH (défini par $\tau_{ce} = \rho \cdot 0,2 \cdot 10^{-8} \cdot (C_{cr.mud.fr})^2$) et le seuil d'écoulement (défini dans la partie IV-3, par $\tau_y = 5 \cdot 10^{-7} \cdot (C_{cr.mud.fr})^3$) étaient deux fonctions croissantes, non linéaires de la concentration en vase relative.

Or, pour Parthéniades (1965) et Migniot (1989), la contrainte critique d'érosion des vases varie proportionnellement à la rigidité initiale (mesurée à l'aide d'un viscosimètre) lorsque cette dernière dépasse 3 Pa (vase consolidée ou en cours de consolidation). En faisant l'hypothèse que cette relation reste valide pour les sédiments vaseux ou sablo-vaseux de Marennes-Oléron, l'expression de τ_{ce} en fonction de la concentration relative de la vase passe alors d'une puissance 2 à une puissance 3, comme celle de τ_y . Nous obtenons ainsi l'équation suivante : $\tau_{ce} = 0,2 \cdot 10^{-7} \cdot (C_{relmud})^3$ qui sera utilisée dans le modèle sédimentaire.

VII-3.2. Variabilité spatiale de la turbidité simulée

L'examen, en plusieurs mailles voisines (Fig. VII-10), montre que la variabilité spatiale des turbidités près du fond est faible. Contrairement aux contraintes de frottements des vagues sur le fond, la turbidité est moins dépendante des variations bathymétriques sur des estrans présentant une faible pente.

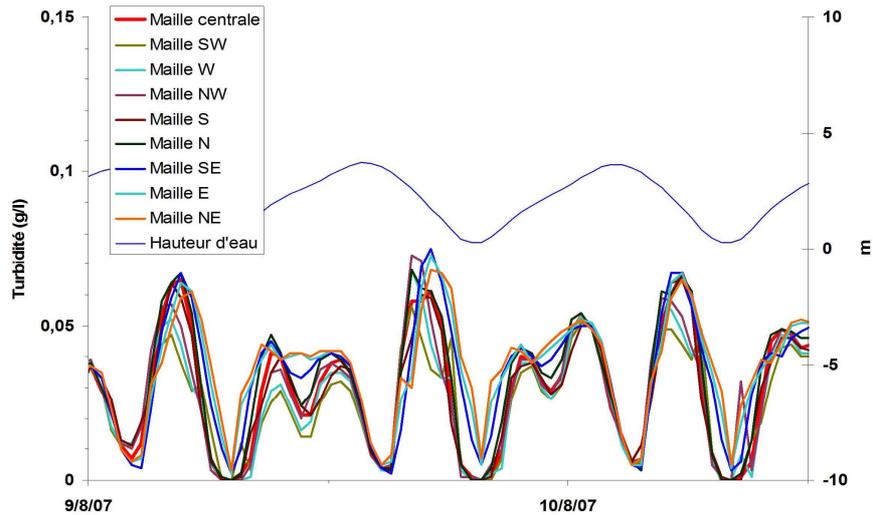


Figure VII-10 : Turbidités simulées à 15 cm du fond, en plusieurs mailles autour du site n°3

VII-3.3. Validation du modèle de transport en suspension

Trois cas de figure sont présentés, le premier correspondant à une comparaison sur l'ensemble de la période simulé (400 jours), et les deux autres, correspondant à deux périodes, plus courtes, (6 et 14 jours) en condition de tempête.

Pour comparer les turbidités simulées, près du fond, avec celles mesurées, différents indicateurs statistiques seront utilisés (tab. VII-3).

- ➔ Le BIAS, correspond à la différence moyenne entre les 2 séries considérées, et s'exprime, ici en g/l : il permet d'estimer si le modèle sous-estime ou sur-estime la turbidité moyenne, près du fond, sur l'ensemble de la période étudiée ; cependant, ce calcul « gomme » les variations qui peuvent exister entre les deux séries temporelles.
- ➔ La RMSE (erreur quadratique moyenne) qui permet d'estimer l'erreur moyenne entre les simulations, et la mesure, par une série temporelle ; dans notre cas, elle s'exprime en g/l.
- ➔ La S.I (erreur quadratique moyenne relative) qui indique, en pourcentage, l'erreur moyenne entre la simulation et la mesure.

<i>BIAS</i>	<i>RMSE</i>	<i>SI</i>
$\bar{x} - \bar{y}$	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}}$	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N x_i^2}}$

Tableau VII-3 : Grandeurs statistiques utilisées pour la comparaison des turbidités simulées et mesurées. On note x_i la valeur mesurée au pas de temps i et y_i la valeur simulée au même pas de temps. \bar{x} et \bar{y} sont respectivement les valeurs moyennes de x_i et de y_i pour les N pas de temps

L'appréciation de ces résultats dépend essentiellement de la gamme de turbidité mesurée sur le site d'étude. Une échelle d'appréciation est proposée dans le tableau suivant :

Variabilité de la turbidité	Appréciation en fonction du SI			
	SI < 40 %	SI ~ 60 %	SI ~ 80 %	SI > 100 %
<i>forte</i>	<i>bon</i>	<i>correcte</i>	<i>satisfaisant</i>	<i>moyen</i>
<i>faible</i>	<i>correcte</i>	<i>satisfaisant</i>	<i>moyen</i>	<i>mauvais</i>

Tableau VII-4 : Echelle d'appréciation des valeurs du SI obtenues pour la comparaison des turbidités mesures/modèle

VII-3.3.1. Périodes avec vagues (banc d'Agnas)

NB : Il n'a pas été possible d'analyser l'effet des vagues sur les matières en suspension sur d'autres sites qu'à Agnas, car aucun enregistrement turbidimétrique correct n'a été réalisé ailleurs, en période de vagues. Cependant, la position centrale du banc d'Agnas dans la baie en fait un indicateur très intéressant du point de vue du mélange global des particules dans la colonne d'eau.

Les figures suivantes (fig. VII-11a et 11b) représentent la comparaison, sur le banc d'Agnas, entre les turbidités mesurées (à l'aide de sondes YSI) et celles simulées par le modèle, à 15 cm du fond. Les périodes observées sont espacées de 3 mois (du 27 novembre au 13 décembre 2007 et du 03 mars au 15 mars 2008). Ces plages temporelles correspondent à des périodes avec des vitesses de vent supérieures à 15 m/s, et donc avec des vagues.

On constate, dans l'ensemble, que les épisodes les plus significatifs sont relativement bien reproduits, ainsi que l'augmentation de la turbidité aux abords du fond. Sa sous-estimation par le modèle le 5 mars 2008, est à attribuer à une sous-estimation des vagues, ce jour-là. D'une manière générale, sur cette période, le modèle reproduit correctement la turbidité moyenne de la zone (BIAS = -0,01). L'erreur relative (SI) est comprise entre 57 à 62% dans les deux cas étudiés, ce qui indique que ces résultats sont corrects, compte tenu de la forte variabilité des turbidités mesurées (tab. VII-5). Les calculs des différents indicateurs statistiques ont été réalisés avec, pour la première période (27/11/07-13/12/07), N = 816 (soit 17 jours, avec un pas de temps de 30 minutes) ; et pour la seconde période (03/03/07-15/03/07), N = 627 (soit 11 jours, avec un pas de temps de 30 minutes)

	27/11/07-13/12/07	03/03/08-16/03/08
Gamme de turbidité mesurée (g/l)	0,01 - 0,25	0,01 - 0,23
Turbidité moyenne mesurée (g/l)	0,06	0,06
BIAS (g/l)	-0,01	-0,01
RMSE (g/l)	0,04	0,05
SI (%)	57	62

Tableau VII-5 : Paramètres statistiques de la simulation de la turbidité près du fond, en période de vagues au niveau du banc d'Agnas, entre le 27/11/07 et le 13/12/07, et entre le 03/03/08 et le 15/03/08

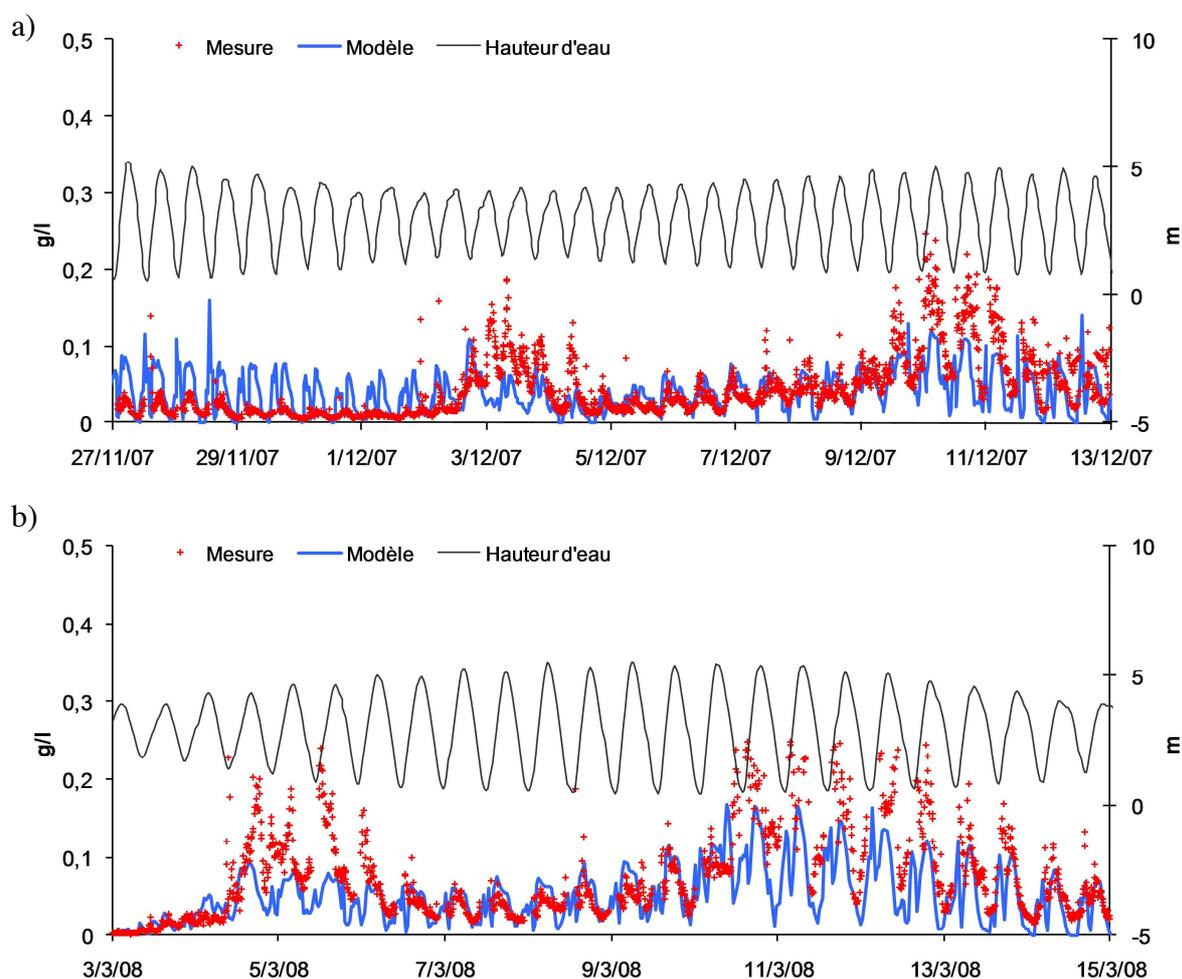


Figure VII-11 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée au niveau du banc d'Agnas, a) entre le 27/11/07 et le 13/12/07, soit 272 jours après le début de la simulation et b) entre le 03/03/08 et le 15/03/08, soit 374 jours après le début de la simulation

VII-3.3.2. Périodes sans vagues

Les figures suivantes (fig. VII- 12 à 17) montrent la comparaison entre les turbidités mesurées (à l'aide de sondes YSI) et simulées par le modèle à 15 cm du fond, au niveau du site des Doux bas (site n°3), du site de Brouage bas (site n°5), et du banc d'Agnas. Les périodes observées sont espacées de 10 mois (du 9 au 24 avril 2007, et du 10 au 20 février 2008). Ces plages temporelles correspondent à des périodes sans vent (sans vagues) et couvrent également un cycle de ME et de VE. Les calculs des différents indicateurs statistiques ont été réalisés, avec pour la première période (09/04/07-24/04/07), N = 719 (soit 15 jours, avec un pas de temps de 30 minutes), et pour la seconde période (10/02/08-19/02/08), N = 479 (soit 10 jours, avec un pas de temps de 30 minutes)

VII-3.3.2.a 1^{er} période, 40 jours après le début de la simulation

Au niveau du site des Doux bas (site n°3), les mesures montrent que la gamme de turbidité évolue, en moyenne, entre 10 mg/l en ME et un peu moins de 100 mg/l en VE, avec des pics proches de 150 à 200 mg/l aux étales de marées basses de VE (fig. VII-12). Un zoom temporel, sur une VE permet de voir, qu'au cours de la marée, un pic de turbidité (environ 70 mg/l) apparaît au moment de l'étalement de marée haute, pic lié à la décantation des particules en suspension en l'absence de courant. La simulation donne des variations d'amplitude comparables. Les valeurs moyennes sont du même ordre de grandeur que les valeurs observées. Il apparaît, toutefois, que l'augmentation de la turbidité, en fin de jusant, est moins forte que dans la réalité. Quant aux petits pics de turbidité observés aux étales de marée haute, ils sont, effectivement, reproduits, mais de manière moins nette. Leur signature se retrouve à la fin du pic de turbidité de début de flot simulé, qui est plus large que sur les mesures. Il est constitué de deux maxima, dont le second correspond à ce phénomène de décantation qui a lieu avant l'étalement de marée haute.

Ces différences avec les mesures *in situ* peuvent s'expliquer en partie par le fait que la turbidité simulée est initialement intégrée sur la verticale, puis que l'on procède à un calcul d'extrapolation de la turbidité à 15 cm du fond.

Sur le bas de la vasière de Brouage (site n°5), le schéma de remise en suspension et de déposition est le même que précédemment (fig. VII-13). Une rapide augmentation de la turbidité est observée au début du flot, suivie d'une chute de cette dernière. Deux pics de turbidité sont observés, le premier juste avant l'étalement de marée haute (lié à la décantation des MES) et le second à la fin du jusant, peu avant le découverture. Les valeurs moyennes de turbidité enregistrées sur ce site varient entre 30 mg/l en mortes-eaux et 200 mg/l en vives-eaux (250 à 450 mg/l au maximum). Le modèle reproduit correctement les amplitudes et l'ordre de grandeur des turbidités observées. Cependant, les valeurs maximales simulées (250 mg/l) sont en dessous des turbidités maximales observées (250 à 450 mg/l). Il semble aussi que dans le modèle, le découverture intervient plus tôt, ce qui pourrait s'expliquer par une côte du fond moyenne dans la maille de calcul supérieure à celle du point de mesure.

Concernant le banc d'Agnas (fig. VII-14), les turbidités mesurées sont relativement faibles près du fond, moins de 10 mg/l en ME et environ 80-100 mg/l en VE, avec des maximums de 110 à 120 mg/l. Le pic de turbidité, au début du flot, est moins rapide, mais dure plus longtemps que pour les autres sites. Le modèle reproduit un signal de turbidité conforme aux observations en termes d'amplitudes et de valeurs moyennes. Il n'a pas été

possible de comparer les turbidités simulées avec celles mesurées à la fin du jusant, car les mesures se sont arrêtées avant.

	<i>Banc d'Agnas</i>	<i>Doux bas</i>	<i>Brouage bas</i>
Gamme de turbidité mesurée (g/l)	0,02 - 0,10	0,02 - 0,15	0,03 - 0,50
Turbidité moyenne mesurée (g/l)	0,02	0,02	0,06
BIAS (g/l)	0,02	0,02	-0,02
RMSE (g/l)	0,04	0,04	0,08
SI (%)	139	121	76

Tableau VII-6 : Paramètres statistiques de la simulation de la turbidité près du fond au niveau du banc d'Agnas, des Doux bas et de Brouage bas, entre le 09/04/07 et le 24/04/07

La turbidité sur le banc d'Agnas, et aux Doux bas (site n°3), est mal simulée (SI = 121 à 139%) (tab. VII-6). En revanche, sur le site de Brouage bas (site n°6), le modèle la reproduit de manière satisfaisante (SI= 76%). Cette différence entre les 3 sites peut venir du fait que la période étudiée est encore trop proche du début de la simulation. La turbidité n'est pas encore bien simulée dans certaines parties du domaine de calcul.

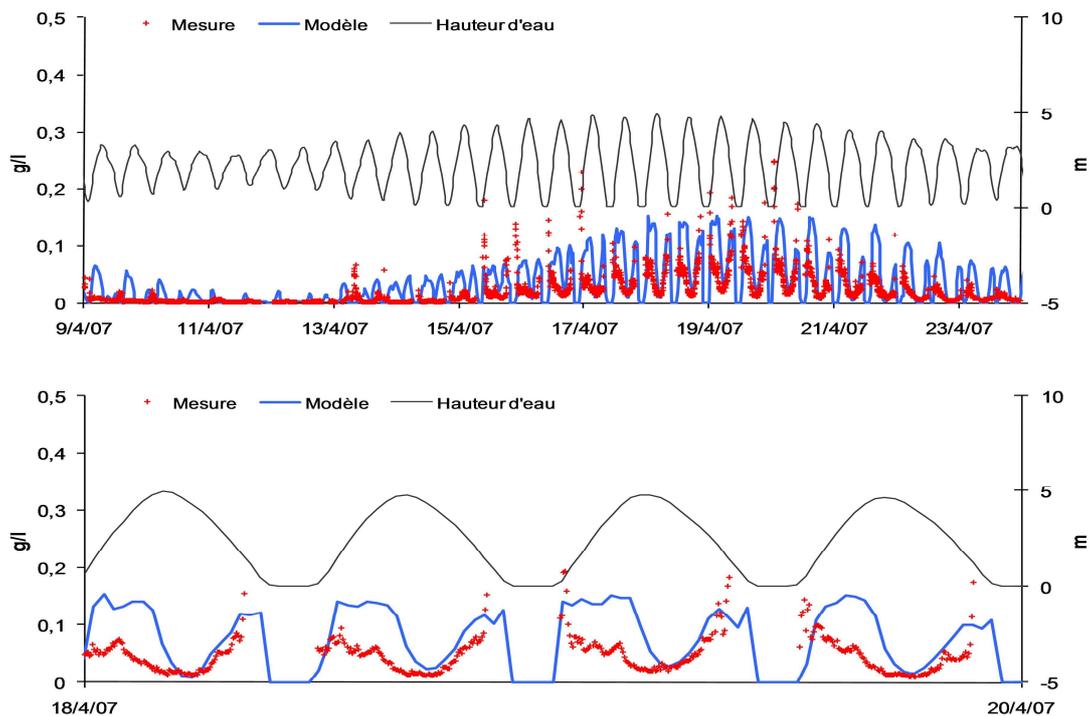


Figure VII-12 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée dans le secteur des Doux bas (site n°3), entre le 9/04/07 et le 24/04/07

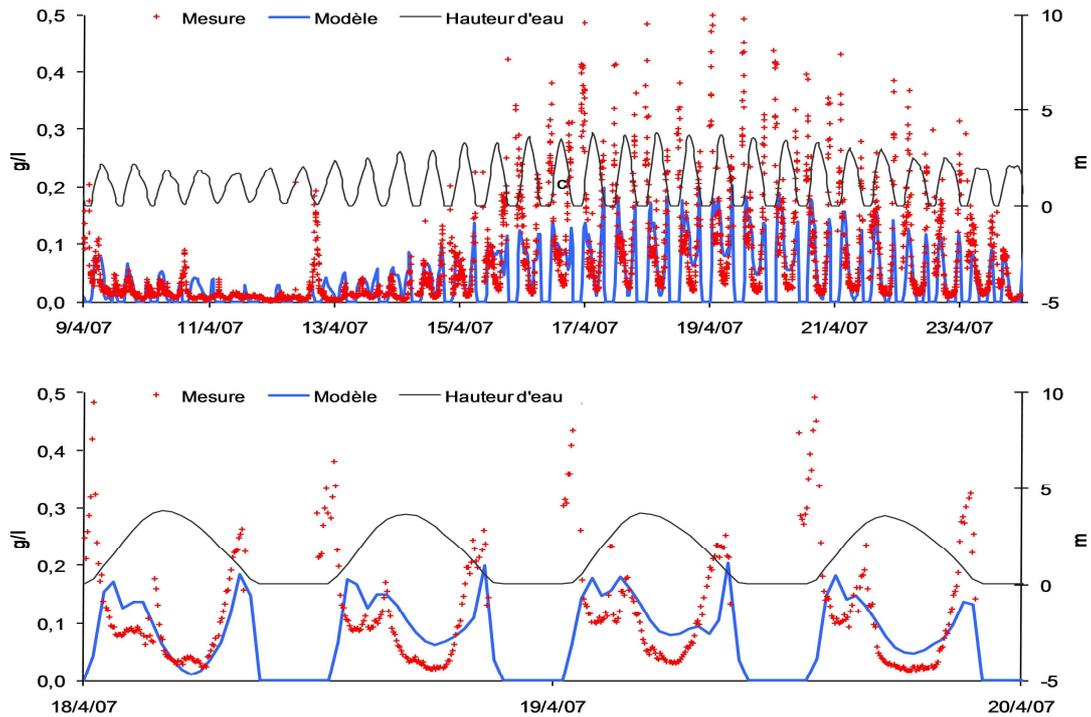


Figure VII-13 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée sur le bas de la vasière de Brouage (site n°5), entre le 9/04/07 et le 24/04/07

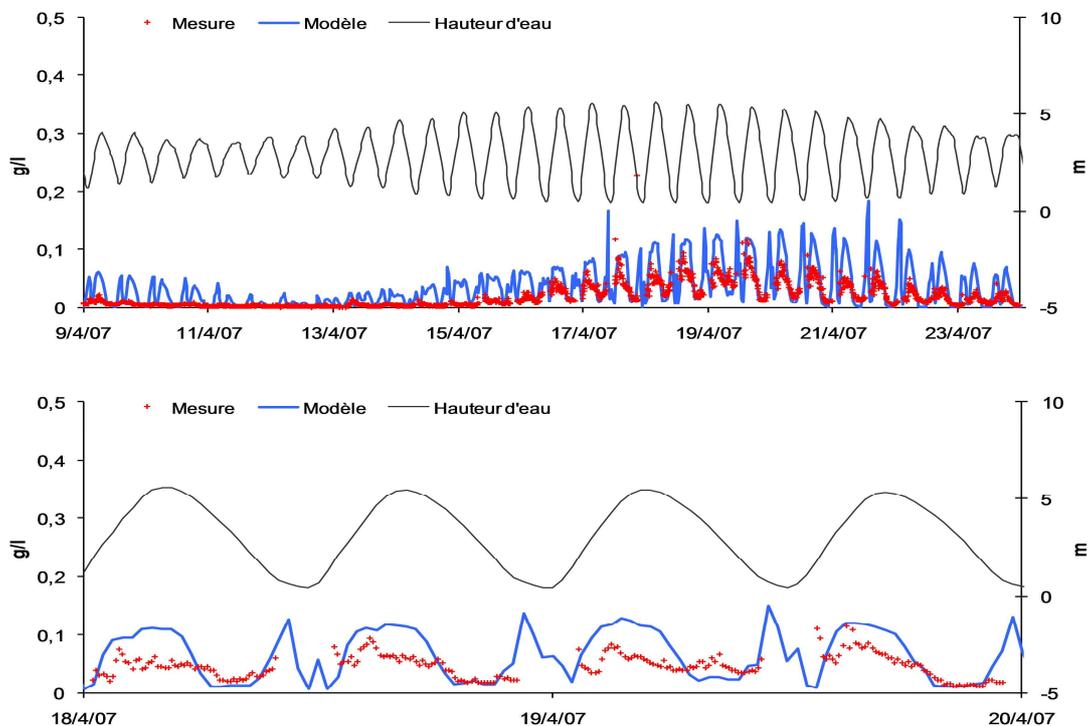


Figure VII-14 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée sur le banc d'Agnas, entre le 9/04/07 et le 24/04/07

VII-3.3.2.b 2^{ème} période, 340 jours après le début de la simulation

Après avoir effectué la simulation sur une période équivalente à 10 mois, les turbidités simulées restent conformes (amplitudes et valeurs moyennes) aux turbidités mesurées, à l'aide des turbidimètres. Les pics de turbidités observés, vers le 16 février 2008, correspondent à une période ventée qui a provoqué la création de vagues au droit des sites de mesure.

Sur le site n°5 (fig. VII-16), les turbidités simulées sont également du même ordre de grandeur que celles mesurées et les amplitudes sont globalement respectées. Une augmentation de la turbidité apparaît à l'étale de marée basse, le 16 février 2008. Le modèle simule aussi une augmentation de turbidité, mais avec un décalage de plusieurs heures en retard. Celui-ci peut être lié à un découvrément partiel dans le modèle (côte du fond légèrement supérieure à la réalité) ou à un retard dû vent et/ou aux vagues.

Concernant le banc d'Agnas (fig. VII-17), les turbidités simulées sont concordantes avec les observations, le pic de turbidité observé lors du coup de vent du 16 février étant reproduit correctement.

	<i>Banc d'Agnas</i>	<i>Doux bas</i>	<i>Brouage bas</i>
Gamme de turbidité mesurée (g/l)	<i>0,01 - 0,08</i>	<i>0,03 - 0,3</i>	<i>0,02 - 0,3</i>
Turbidité moyenne mesurée (g/l)	<i>0,02</i>	<i>0,06</i>	<i>0,05</i>
BIAS (g/l)	<i>0,00</i>	<i>-0,04</i>	<i>-0,01</i>
RMSE (g/l)	<i>0,02</i>	<i>0,07</i>	<i>0,06</i>
SI (%)	<i>71</i>	<i>78</i>	<i>74</i>

Tableau VII-7 : Paramètres statistiques de la simulation de la turbidité près du fond, au niveau du banc d'Agnas, des Doux bas et de Brouage bas, entre le 10/02/08 et le 20/02/08

Après 10 mois de simulation, les erreurs relatives pour chaque site sont comprises entre 71 et 78% (tab. VII-7). Le modèle simule donc des turbidités satisfaisantes sur les trois sites.

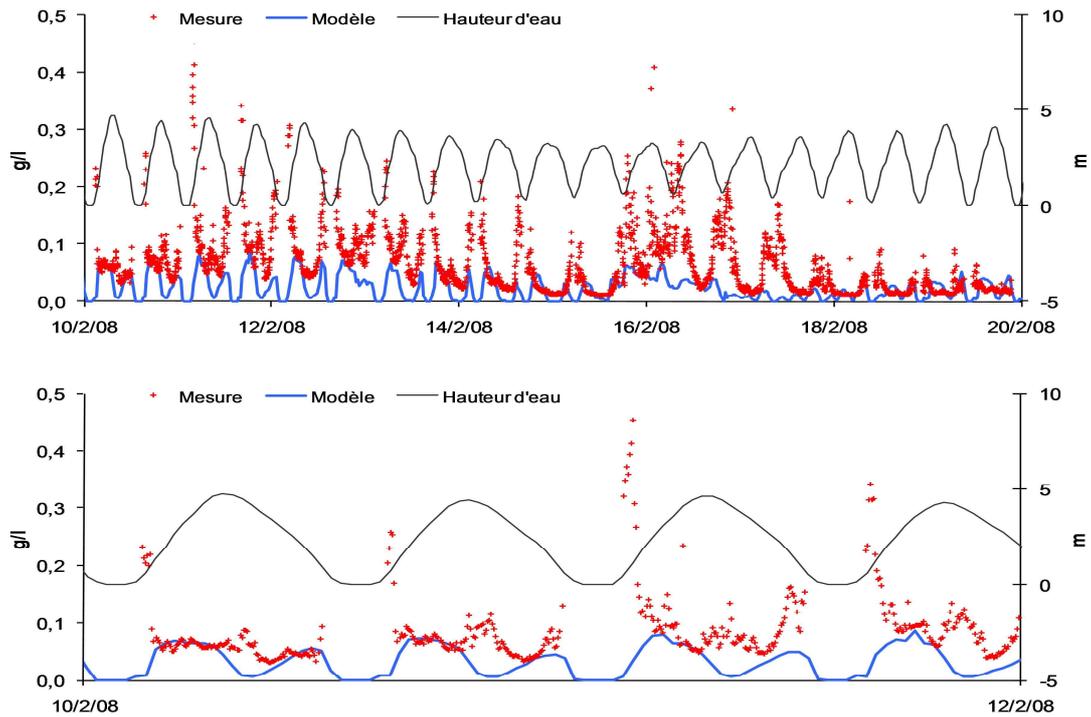


Figure VII-15 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée dans le secteur des Doux bas (site n°3), entre le 10/02/08 et le 20/02/08

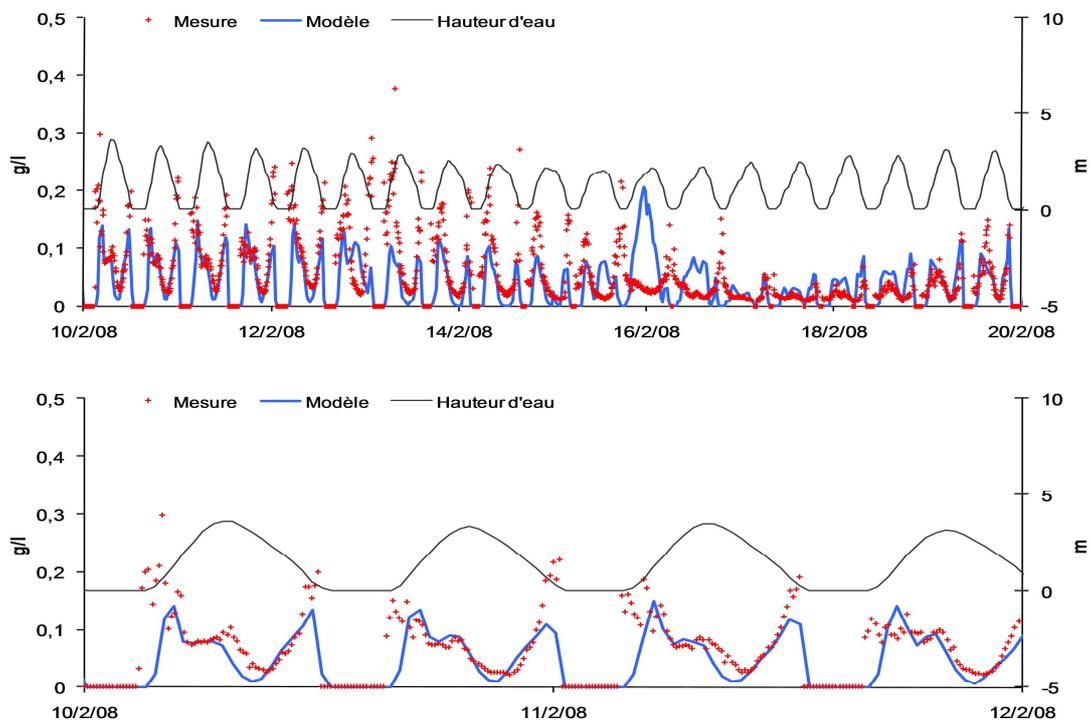


Figure VII-16 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée sur le bas de la vasière de Brouage (site n°5), entre le 10/02/08 et le 20/02/08

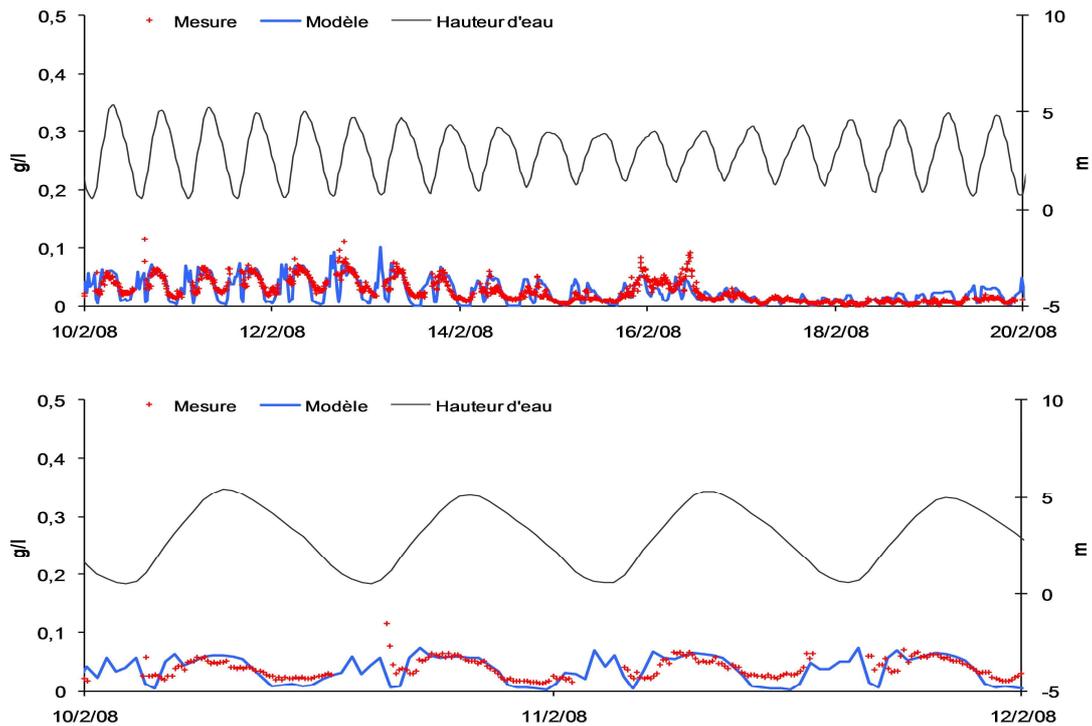


Figure VII-17 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée sur le banc d'Agnas, entre le 10/02/08 et le 20/02/08

VII-3.4. Synthèse

Le modèle a montré, dans différentes situations, sa capacité à reproduire les tendances observées, sur une longue période. Les simulations intégrant une puissance 3 dans le calcul de la contrainte critique d'érosion montrent une bonne réponse du modèle par rapport aux mesures *in situ* de turbidité et aux mesures altimétriques (ALTUS), même dans le cas d'épisodes de tempêtes. Un décalage entre les pics de turbidité simulés et mesurés peut apparaître de temps à autres, sur le bas de la vase de Brouage. Ce problème ne semble pas lié au modèle sédimentaire mais plutôt lié à une cote du fond moyenne dans la maille supérieure à celle du point de mesure, le modèle simulant un découvement plus tôt que prévu.

L'analyse des turbidités simulées en période calme, montre que le modèle reproduit rapidement et correctement les turbidités mesurées. Après 10 mois de simulation, le modèle ne présente pas de dérive excessive, que ce soit au niveau des concentrations moyennes, comme des amplitudes de variation. Les pics de décantation observés lors des étales de marées hautes ne sont pas bien reproduits par le modèle. La vitesse de chute dans le modèle est peut-être trop importante, ou bien, l'équilibre supposé (dépôt = érosion) pour reconstituer une concentration à 15 cm du fond n'est pas vraiment réalisé. Cela ne signifie donc pas que la concentration moyenne sur la verticale, calculée par le modèle, est erronée.

On peut donc considérer que le calibrage du modèle en MES est tout à fait acceptable. Le paramétrage choisi permet d'avoir un modèle de MES correcte et robuste.

NB : Les paramétrages d'un modèle sédimentaire sont le fruit de compromis et ne sont pas définitif. Il est important de vérifier que les résultats annoncés sont robustes vis à vis des incertitudes liées au paramétrage (ainsi qu'aux conditions initiales et aux conditions aux limites). Pratiquement, les paramétrages choisis sont généralement susceptibles d'être modifiés en fonction d'informations nouvelles (sur la nature sédimentaire, ou liées à des mesures supplémentaires...).

VII-4. Analyse des résultats de la modélisation hydro-sédimentaire appliquée au bassin de Marennes-Oléron

Les comparaisons entre les contraintes de cisaillement des vagues sur le fond et les turbidités simulées, avec celles déterminées lors de l'étude hydro-sédimentaire, montrent une concordance satisfaisante, en l'état, entre les mesures, et le modèle. Il est donc à présent légitime, d'étudier les résultats numériques, décrivant les processus sédimentaires ainsi que l'impact de l'ostréiculture sur la sédimentation générale. La simulation, sur une période de 400 jours, prend en compte la présence saisonnière des installations ostréicoles.

VII-4.1. Comparaison des répartitions des fractions vase en surface

La fraction résiduelle de vase simulée (frac.va.) contenue dans les 2 premiers millimètres du sédiment, pour deux périodes (10 jours) contrastées de l'année (été et hiver), est comparée (fig. VII-18) avec celle fournie par les cartes des sédiments superficiels établies dans la partie IV-3.3.

Il est rappelé que les cartes des sédiments superficiels présentées dans la partie IV-4. ont été réalisées à partir de prélèvements ponctuels. Les représentations des limites de faciès résultent des interprétations des résultats sédimentaires, et des observations faites sur le terrain.

Afin de procéder aux comparaisons entre les observations et les résultats du modèle, il est important de rappeler les correspondances entre les fractions de vases dans le modèle et celles correspondant aux faciès sédimentaires utilisés dans les cartes saisonnières (tab. VII-8).

Etude sédimentologique		Modèle SiAM
<i>Faciès sédimentaire</i>	<i>Fraction de vase (%)</i>	<i>Fraction de vase (%)</i>
<i>Sables</i>	<i>0-10</i>	<i><20</i>
<i>Sables peu vaseux</i>	<i>10-25</i>	
<i>Sables vaseux</i>	<i>25-40</i>	<i>20-50</i>
<i>Sables très vaseux</i>	<i>40-55</i>	
<i>Vases sableuses</i>	<i>55-71</i>	<i>50-80</i>
<i>Vases peu sableuses</i>	<i>71-82</i>	
<i>Vases</i>	<i>82-100</i>	<i>>80</i>

Tableau VII-8 : Correspondances entre les fractions de vases correspondant aux faciès sédimentaires utilisés dans les cartes saisonnières (cf part. IV-4.) avec les fractions de vases retenues dans le modèle SiAM-2DH

Récapitulatif des périodes retenues et des conditions environnementales :

Situation estivale : période retenue : 11-21 août 2007 ; coefficients de marée : 37 à 91, avec un marnage compris entre 4,20 et 6 m ; Condition météo : vent de direction NW à N, avec une vitesse moyenne comprise entre 1 et 12 m/s.

Situation hivernale : période retenue : 11-21 mars 2008, coefficient de marée : 101 à 40, avec un marnage compris entre 4,20 et 6 m, Condition météo : vent de direction W à N, avec une vitesse moyenne comprise entre 4 et 16 m/s.

En été, la vasière de Brouage présente des concentrations résiduelles de vase simulées en surface supérieures à 80%, ce qui est conforme aux observations. L'extension latérale de cette couverture vaseuse est très importante. En hiver, la concentration en vase simulée reste supérieure à 80%, sauf dans la partie basse de l'estran, près du coureau d'Oléron, où elle devient inférieure à 50%. Ce constat n'est pas visible sur les cartes saisonnières. Cependant, des observations visuelles en hiver ont montré que des sédiments sableux pouvaient enrichir les sédiments de surface (plusieurs centimètres de dépôts sableux), notamment dans la partie Nord de la vasière.

Sur le banc de Lamouroux, le modèle simule une forte variabilité, au niveau de la couverture sédimentaire, entre les deux périodes. Au cours de l'été, dans les zones ostréicoles, le modèle reproduit une fraction vaseuse résiduelle en surface supérieure à 80%. Les parties non occupées par les installations ostréicoles restent sableuses (frac.va. < 20%). Ceci est cohérent avec les observations, hormis pour la branche Est du banc sur laquelle il n'a pas été observé de dépôts vaseux en plein été. En revanche, en période hivernale, et en l'absence d'installations, le modèle simule un dépôt sableux sur l'ensemble du banc. Ces modifications saisonnières de la couverture sédimentaire du banc sont en accord avec les observations.

Au cours de l'été, sur l'ensemble de la zone de Boyardville, le modèle simule une couverture essentiellement vaseuse (frac.va. > 80%), avec une augmentation de la fraction

sableuse vers le haut de l'estran. Les résultats du modèle sont légèrement différents des observations, les concentrations de vase en surface étant souvent supérieures aux observations. En revanche, l'hiver, un patch vaseux est simulé dont l'extension est conforme aux observations, quoique ce dernier montre une fraction vaseuse plus importante (frac.va. > 80%) qu'en réalité (frac.va. = 55-71%).

Le modèle simule, en été, sur la zone des Doux, une forte fraction de vase (frac.va. > 80%), en surface, en bas et en haut de l'estran. Cette forte fraction en surface sur le bas de l'estran est due à la présence de tables ostréicoles. Ces résultats sont en accord avec les observations. En revanche, entre ces deux zones, le sédiment est moins vaseux (frac.va. < 50%). Dans la réalité, cette partie de l'estran est occupée par une zone d'herbiers très importante. Les effets de ces derniers sur la sédimentation ne sont pas reproduits dans le modèle. Les dépôts de vase sont donc limités dans la partie centrale du platier. En hiver, le modèle reproduit plutôt bien les fractions de vase en surface par rapport aux observations. Le bas de l'estran est constitué de sable, tandis que les sédiments superficiels de la partie haute sont constitués de plus de 50% de vase.

L'été, autour du Château d'Oléron, le modèle simule des dépôts vaseux (frac.va. > 80%). Cependant, ces dépôts se distribuent par gros patchs, alors que les observations montrent un dépôt vaseux plus uniforme. Cette configuration dans le modèle peut provenir des anfractuosités créées par le maillage qui constituent autant de « pièges potentiels » à sédiment. En hiver, le modèle reproduit une fraction résiduelle vaseuse des sédiments plus faible, correspondant aux observations. Quelques patchs plus vaseux sont simulés, mais ils peuvent résulter d'un piégeage lié à la forme des mailles.

Dans l'ensemble, le modèle reproduit plutôt correctement, sur les estrans de la baie, les fractions de vase en surface observées.

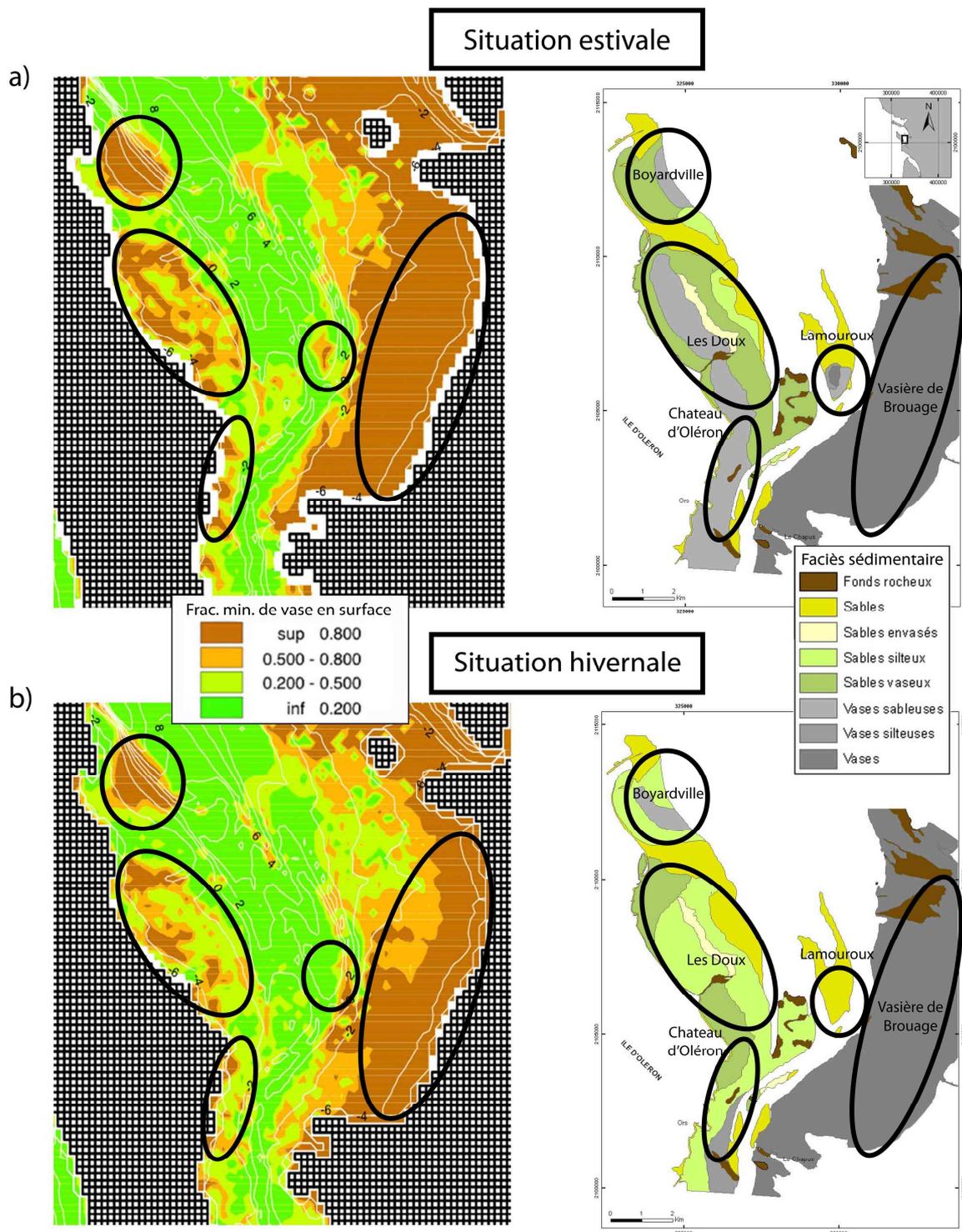


Figure VII-18 : Comparaison des fractions résiduelles de vase simulées avec les cartes sédimentaire établies dans la partie IV-4. La variable représentée pour les sorties du modèle est la valeur minimale de la fraction massique de vase dans les deux premiers millimètres du sédiment, pendant un cycle de marée complet (ME+VE), soit 10 jours. a) La situation estivale est prise entre le 11 et le 21 août 2007. b) La situation hivernale est prise entre le 11 et le 21 mars 2008

VII-4.2. Identification des zones à forte et faible mobilité

La figure VII-19a présente les zones en érosion, ou en accumulation résiduelle, entre le 9 avril 2007, et 4 avril 2008. Pour réaliser cette carte, un différentiel bathymétrique de la côte du sédiment est réalisé entre les deux dates étudiées, sans distinction des types de sédiment. Au terme de la simulation, les zones, apparemment en accrétion, et celles, en érosion, sont identifiables. Cependant, ces résultats intègrent l'effet du tassement des sédiments vaseux ou sablo-vaseux pendant l'année de simulation, de telle sorte qu'une réduction d'épaisseur de sédiment, qui se traduit par un différentiel bathymétrique négatif, peut résulter d'un tassement, autant que d'une érosion résiduelle. Il est donc préférable de discuter des érosions/dépôts sur le diagramme des variations de stock sédimentaire en kg/m^2 (fig.VII-19b)

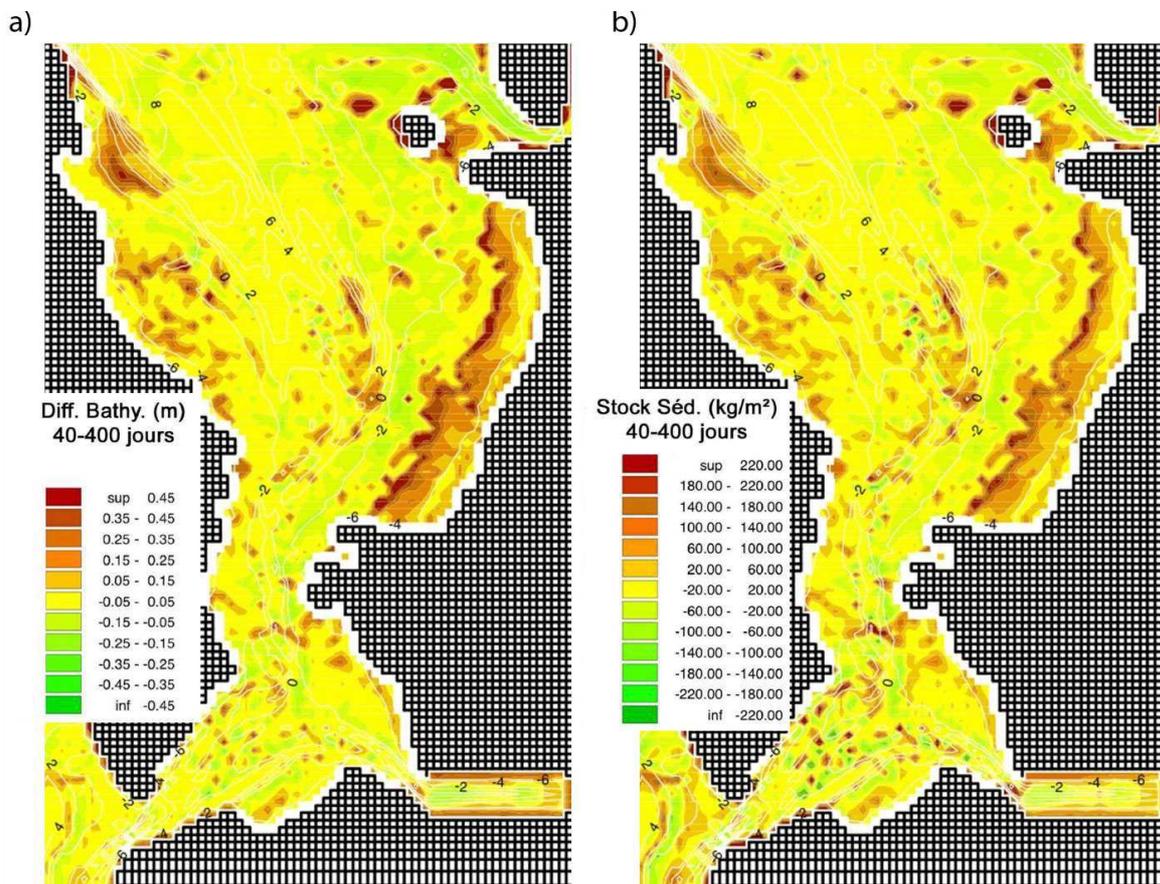


Figure VII-19 : Evolutions a) de la bathymétrie et b) des stocks sédimentaire de la baie, entre le 40e jour (09/04/07) et le 400e jour de simulation (04/04/08)

Les zones, en érosion nette, sont localisées au niveau de l'embouchure de la Charente, dans les secteurs à l'Ouest et Nord-Ouest de l'île d'Aix et au niveau de la partie basse de la vasière de Brouage. Sur le bas de la vasière, le modèle estime une érosion relative, comprise entre 5 à 25 cm, et une baisse du stock sédimentaire, comprise entre 20 et 100 kg/m^2 , irrégulièrement répartie. Ces valeurs paraissent fortes, comparées aux mesures altimétriques réalisées sur ce site (fig. VII-20), qui montraient une érosion relative d'environ 6 cm. On peut supposer qu'une mauvaise représentation de la dynamique du bouchon vaseux de la Charente, dans le modèle, est à l'origine de l'absence d'accrétion sur la vasière de Monportail-Brouage

en hiver. Les observations des hauteurs de sédiments sur cet estran, montrent l'influence de l'expulsion du bouchon vaseux de la Charente, au même moment, lorsque celle-ci est en crue (cf. part. V-3.4.2.).

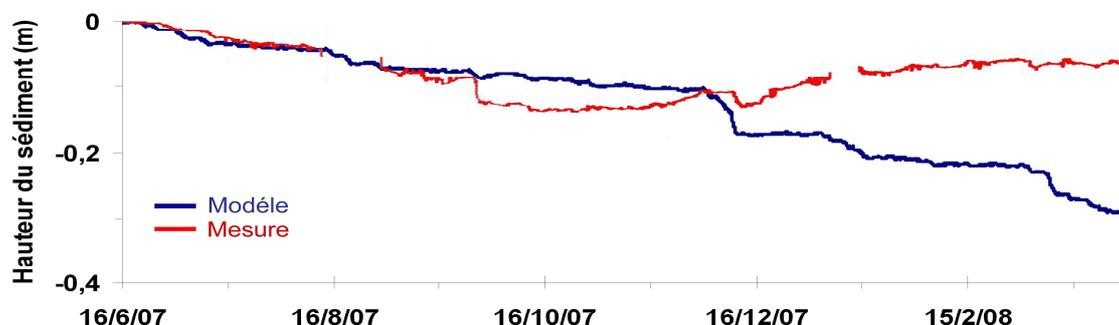


Figure VII-20 : Comparaison de l'altitude de l'interface sédimentaire simulée et mesurée, entre le 16/06/07 et le 01/04/08, sur le bas de la vasière de Brouage (site n°5). (NB : au début du mois d'octobre 2007, un problème d'affouillement au niveau de la station de mesure a provoqué l'érosion visible sur les mesures, cf. part. V-3.4.2.)

La partie centrale de la vasière montre une accumulation moyenne à importante de sédiment (100-180 kg/m², soit 15 à 45 cm), tandis que la partie haute n'est qu'en légère accrétion (moins de 50 kg/m², ce qui ferait moins de 10 cm pour une vase à 500 kg/m³), mais cela reste à confirmer par des mesures altimétriques *in situ*. En revanche, sur le haut de la vasière, le tassement simulé reste compatible avec la variation altimétrique observée.

Les secteurs ostréicoles, notamment sur la partie Est de l'île d'Oléron, et sur le banc de Lamouroux, sont caractérisés par des dépôts plus ou moins importants. Ces dépôts relatifs simulés sont de l'ordre de 20 à 100 kg/m² (soit, 5 à 20 cm pour une vase à 500 kg/m³). Cette estimation est comparable aux écarts bathymétriques mesurés sur le banc de Lamouroux, entre 2007 et 2008 (cf. part. VI-4.2.). Le haut de l'estran de la partie Est de l'île d'Oléron (secteur des Doux), le secteur du Château d'Oléron, et la partie Sud de la baie, semblent stables. Les mesures altimétriques confirment ces constatations pour la partie haute des Doux (cf. part. V-2.4.2.).

VII-4.3. Influence de l'ostréiculture sur la sédimentation dans la baie

Les huîtres affectent la baie de manière saisonnière. L'étude des faciès sédimentaires en fonction de la saison (cf. part. IV.4), mais également les résultats altimétriques et granulométriques obtenus sur le banc de Lamouroux (cf. part. VI) ont montré l'importance de ces changements. Pour comprendre l'impact de l'ostréiculture dans la baie, deux simulations du transport sédimentaire ont été réalisées : la première prenait en compte la présence des huîtres (avec une installation saisonnière) ; la seconde a été réalisée sans huîtres. Les simulations ont démarré le 1^{er} mars 2007, et se sont terminées le 4 avril 2008 ; elles ont duré 400 jours.

Dans cette partie, seront présentés les résultats de 12 mois de simulation concernant l'influence des tables ostréicoles sur les évolutions bathymétriques relatives et sur les variations de la fraction vaseuse dans les sédiments superficiels, à l'échelle de la baie. Puis, une étude détaillée complémentaire sur la biodéposition dans un parc ostréicole (banc de Lamouroux) sera exposée.

VII-4.3.1. Sensibilité des variations altimétriques des sédiments à l'implantation des huîtres

La figure VII-21 représente la différence d'altitude (érosion/dépôt) entre le 40^e jour (09/04/07) et le 400^e jour (04/04/08) de simulation, tandis que la figure VII-22 montre les variations du stock sédimentaire. La visualisation de ce dernier paramètre permet de s'affranchir des effets du tassement dans les sédiments. L'étude des résultats des simulations indique que les principales différences bathymétriques se situent dans la partie occidentale et centrale de la baie :

Au niveau de Boyardville, une zone d'accrétion, avec des dépôts pouvant atteindre 220 kg/m², est simulée en présence des installations ostréicoles. En revanche, lorsque elles sont absentes de la simulation, un piégeage de vase est toujours simulé mais les stocks sédimentaire sont moins importants (140-180 kg/m²). La présence des installations ostréicoles, sur cette zone, augmente la sédimentation vaseuse.

Un peu plus au Sud, dans le secteur des Doux, le modèle simule, en présence des tables à huîtres, des dépôts compris entre 20 et 140 kg/m², localement, alors que le haut de l'estran est plutôt stable. Sans ces installations, la partie basse et haute de l'estran ne montre pas d'évolution, les variations altimétriques étant quasiment nulles.

A l'Est du Château d'Oléron, la présence des tables à huîtres entraîne une élévation des fonds relativement faible, comparable à celle simulée en l'absence des huîtres. Cette zone est plutôt stable.

La partie Sud du Château d'Oléron ne semble pas être affectée par la présence ou non des installations ostréicoles. Dans les deux cas, cette zone reste stable.

Sur le banc de Lamouroux, la branche Est est en accrétion (dépôts > 25 cm) dans les deux simulations. Cette élévation n'est donc pas liée à l'ostréiculture. La branche Ouest est relativement stable, et ne semble pas affectée par la présence des tables à huîtres. En revanche, la partie Sud du banc subit les effets de leur présence. A la fin de la période étudiée, cette partie du banc présente une accrétion comprise entre 20 et 100 kg/m², tandis que sans les huîtres, cette partie du banc est relativement stable.

Le reste de la baie semble moins affecté par l'ostréiculture, notamment dans la partie Sud (en dessous du Chapus). La comparaison entre les deux simulations montre que les différences altimétriques sont moins importantes que dans la partie Nord. Les tendances aux érosions/dépôts sont les mêmes, que la simulation soit réalisée avec ou sans les tables à huîtres.

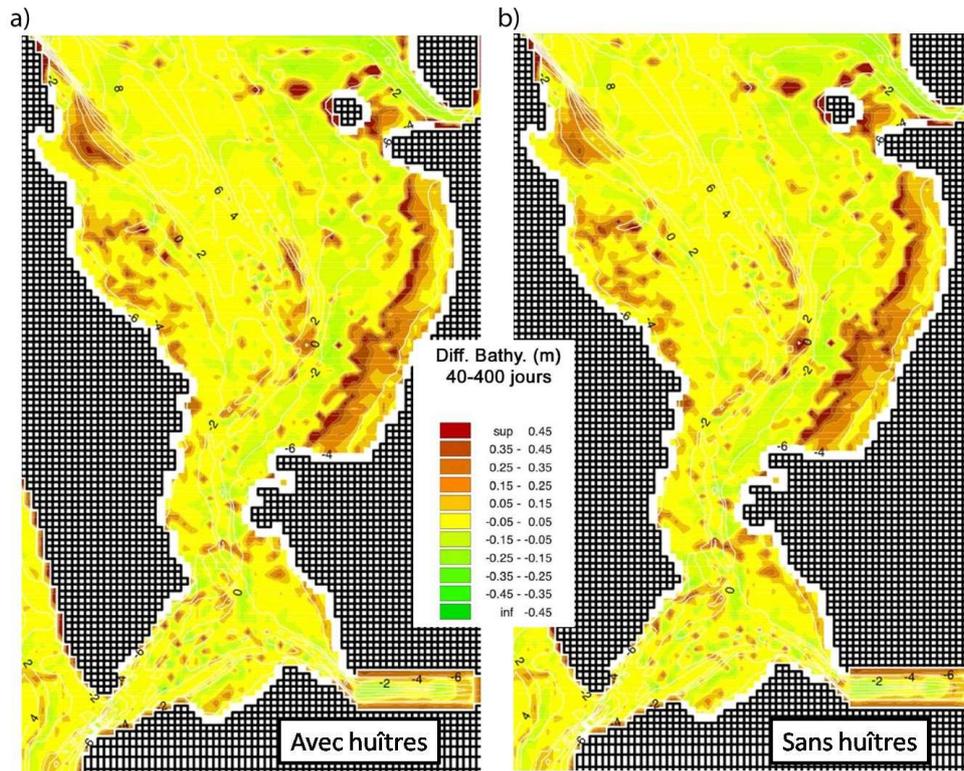


Figure VII-21 : Cartes des variations altimétriques simulées par le modèle, entre le 40e et le 400e jour de simulation, a) en présence et b) en l'absence d'huîtres

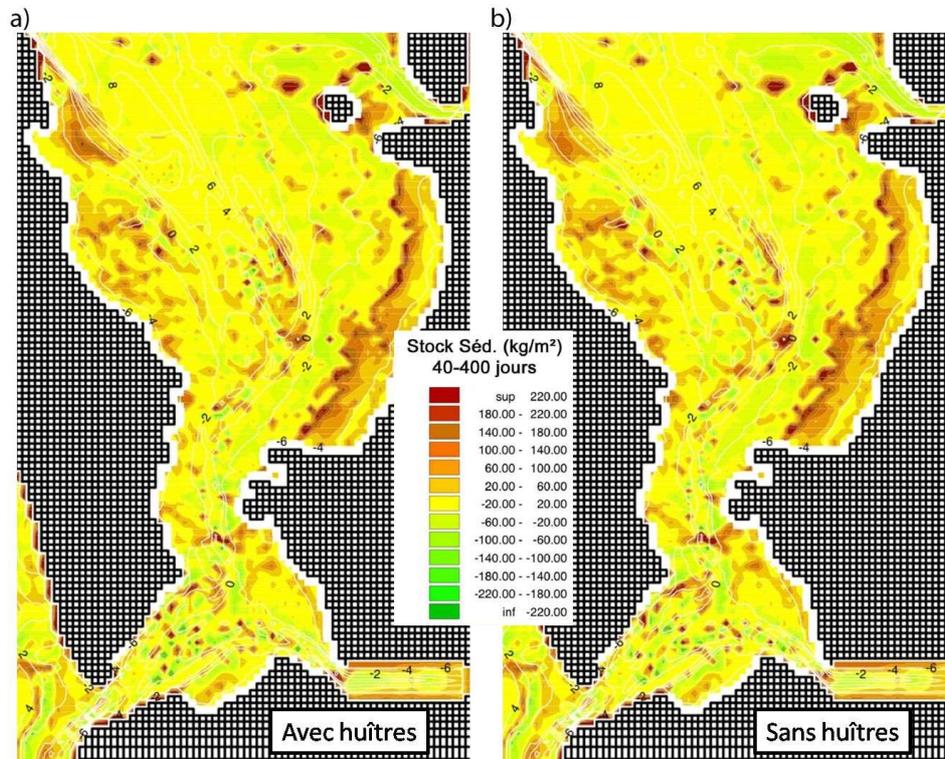


Figure VII-22 : Cartes des variations du stock sédimentaire simulées par le modèle, entre le 40e et le 400e jour de simulation, a) en présence et b) en l'absence d'huîtres

VII-4.3.2. Variation de la fraction vaseuse dans la couche superficielle en présence et en l'absence des installations ostréicoles

La figure VII-23 représente la fraction de vase en surface (0-2 mm) simulée, pendant 10 jours au cours de l'été 2007, et de l'hiver 2008, en fonction de la présence, ou de l'absence, des installations ostréicoles dans la baie.

L'analyse de ces résultats montre que la fraction de vase en surface est identique en hiver, pour les deux simulations. Ceci est normal, étant donné que dans la simulation avec présence des installations, ces dernières sont enlevées au cours de l'hiver. Les mécanismes sédimentaires sont donc les mêmes, dans les deux cas. En revanche, en été, l'absence d'huîtres dans le système modifie la composition des sédiments superficiels dans la partie aval des Doux, à l'Est du Château d'Oléron, et sur le banc de Lamouroux, entraînant une sédimentation plus sableuse (fraction de vase < 50%).

Les modifications de la composition des sédiments restent circonscrites sur ces zones, ce qui ne semble pas être le cas dans le reste de la baie. La sédimentation simulée dans le secteur de Boyardville, au sud du Château d'Oléron, ou encore dans la partie Sud de la baie, semble être conditionnée par les facteurs hydrodynamiques ou morphologiques, plutôt que par l'influence des huîtres. Sur une période de 12 mois et à l'échelle de la baie, l'impact des huîtres sur les changements de nature des sédiments superficiels semble relativement faible.

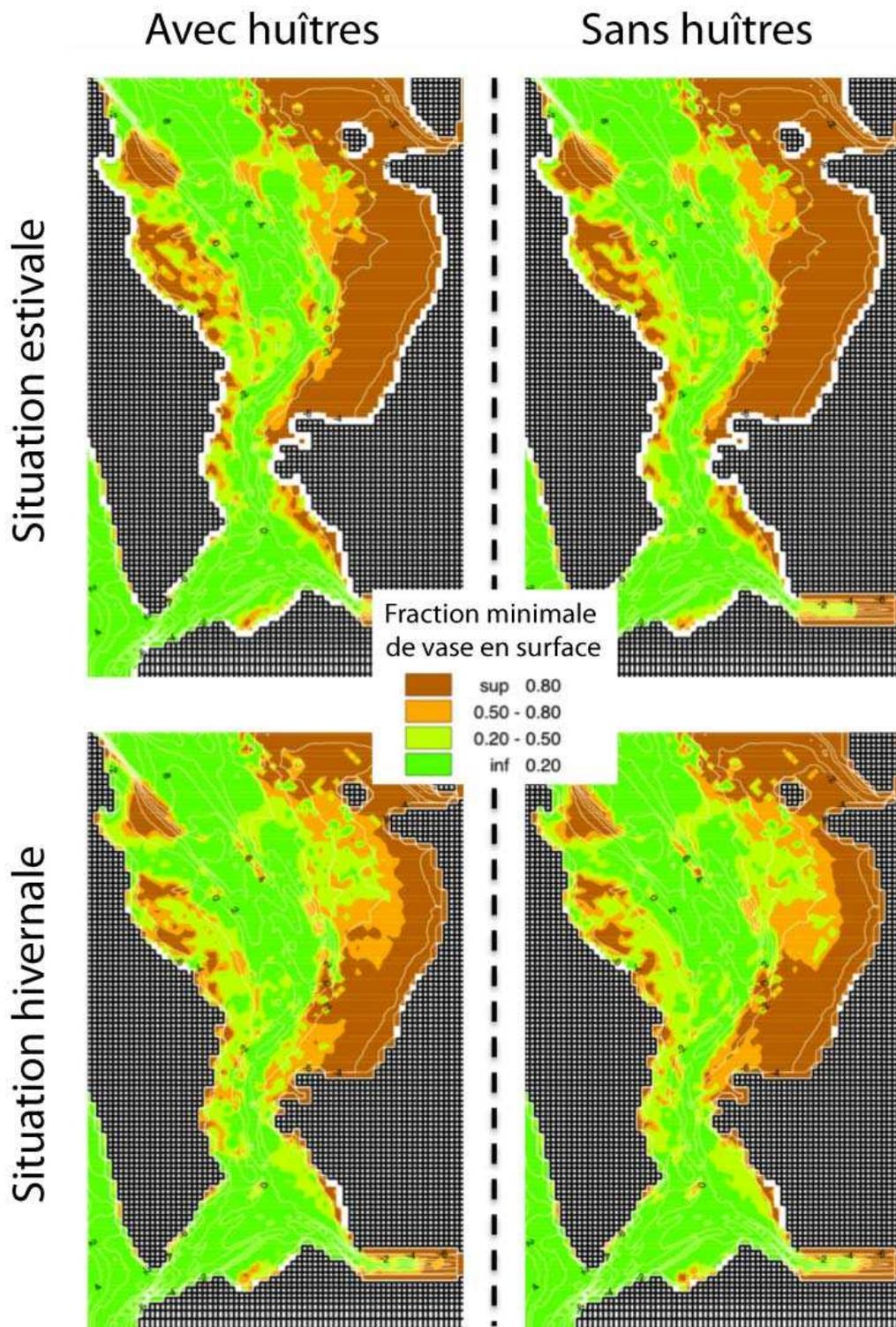


Figure VII-23 : Couvertures sédimentaires simulées, en été et en hiver, avec et sans installations ostréicoles. La variable représentée est la valeur minimale de la fraction massique de vase dans les deux premiers millimètres du sédiment, pendant un cycle de marée complet (ME +VE). La situation estivale est prise entre le 12 et le 22 août 2007. La situation hivernale est prise entre le 12 et le 22 mars 2008

VII-4.3.3. Effets des installations sur l'envasement des zones ostréicoles : cas du banc de Lamouroux

La figure VII-24 indique les variations de la hauteur du sédiment enregistrées sur le banc de Lamouroux entre le 15/06/07 et le 21/03/08. Au début de l'enregistrement, la sédimentation est essentiellement sableuse. Puis à partir du 13/07/07, elle devient vaseuse en présence des tables à huîtres.

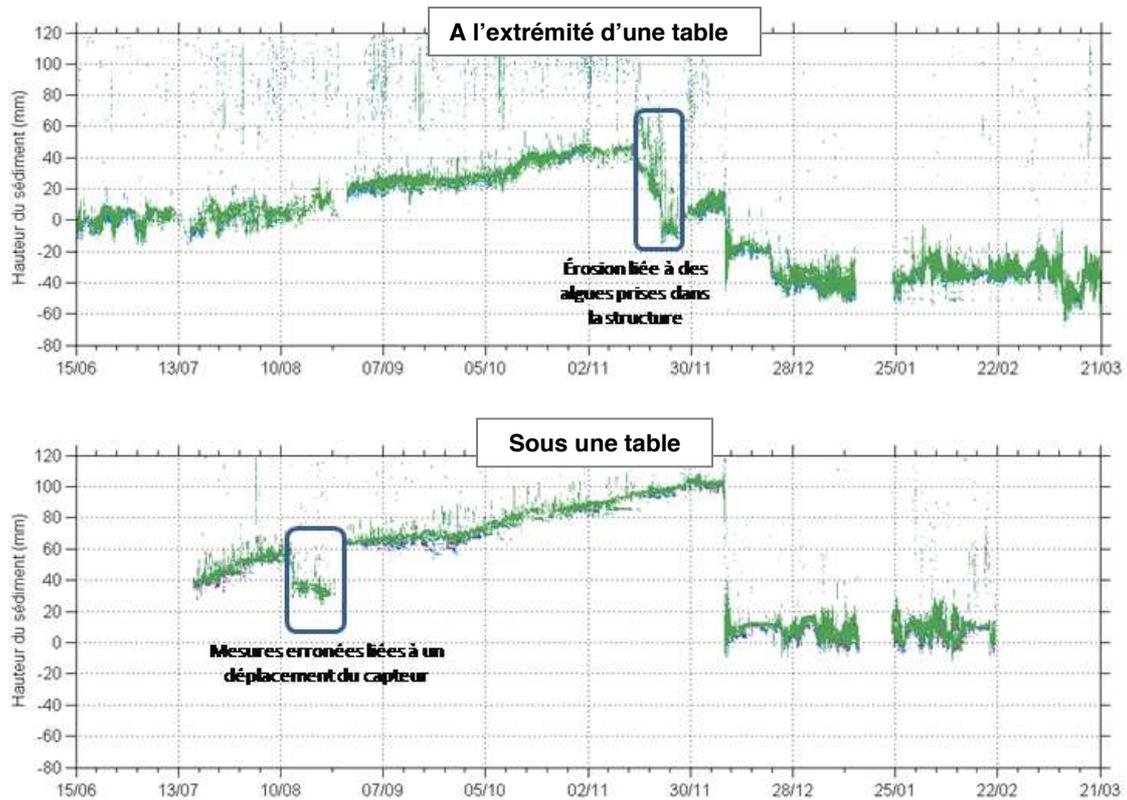


Figure VII-24 : Variations altimétriques mesurées par les ALTUS sous (Lamouroux « st ») et à l'extrémité d'une table ostréicole (Lamouroux « bt ») sur le banc de Lamouroux

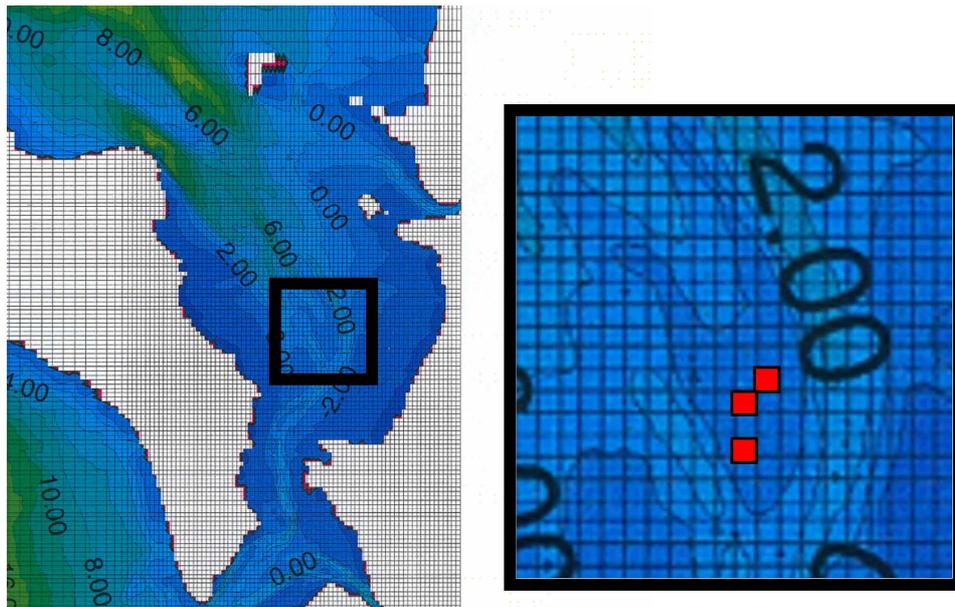


Figure VII-25 : Position des mailles (99,80), (98,77) et (98,79) matérialisées par les carrés rouges, (98,77) étant la maille la plus au Sud et (99,80) la plus au Nord

La figure VII-27 montre les variations altimétriques, ainsi que la fraction de vase, en surface, pour plusieurs mailles du modèle (fig. VII-25) correspondant à la zone de mesure altimétrique. Les tables ostréicoles sont installées le 93^e jour (01/06/07), et sont enlevées le 275^e jour (30/11/07), dans le modèle, en accord avec les observations réalisées sur le terrain.

Le modèle montre une certaine variabilité en termes de hauteur de dépôt et de composition des sédiments superficiels, selon les mailles observées. Avant la mise en place des huîtres, la hauteur de sédiment reste stable : les dépôts sont faibles et il n'y a pas d'érosion. La fraction de vase dans les 2 premiers millimètres du sédiment varie, énormément, en fonction de la marée. La maille (98,79), qui est située au centre du banc, est plus souvent vaseuse en surface.

Lorsque les huîtres sont implantées (93-275^e jour), le modèle reproduit un envasement continu (fraction de vase = 100 %) dans les 3 mailles, avec des hauteurs de vase différentes. La maille (98,77) montre le plus fort envasement avec + 9 cm, tandis que les deux autres mailles montrent un envasement entre 5 et 8 cm. Ces valeurs sont tout à fait comparables à celles mesurées.

Lorsque les deux tempêtes de début décembre affectent la zone, le modèle simule des érosions différentes des dépôts estivaux suivant les mailles observées, mais il ne simule pas d'érosion en masse. Cependant, ces résultats ne sont pas contradictoires avec les observations. La figure VII-26 montre l'état de la surface du banc juste après la deuxième tempête et la variabilité spatiale des érosions des sédiments vaseux.

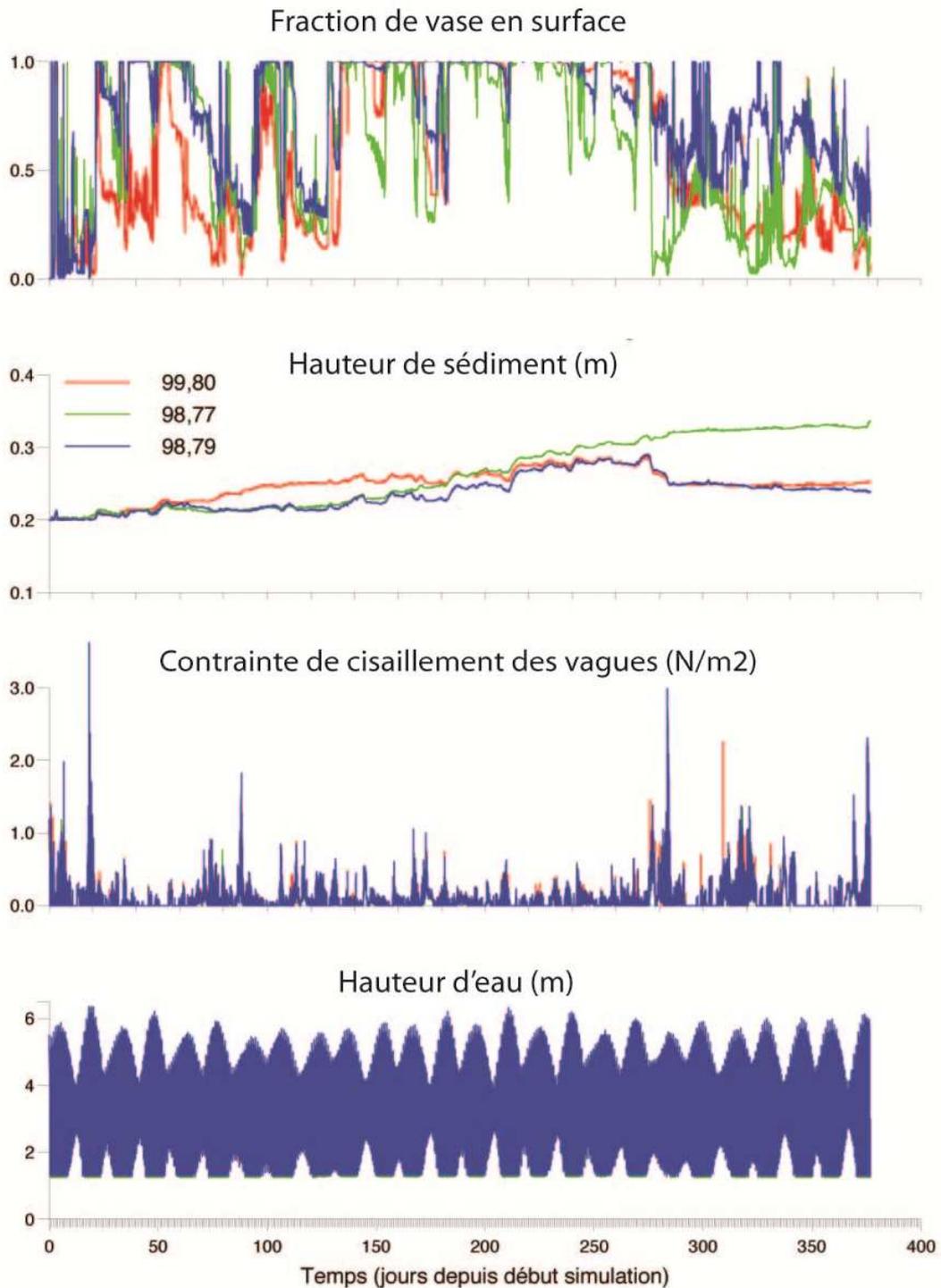


Figure VII-26 : Détails des variations de la fraction de vase en surface, de la hauteur du sédiment, des tensions de cisaillements des vagues et du niveau de marée, sur le banc de Lamouroux. (période simulée : du 01/03/07 au 04/04/08)

Après ces événements, la sédimentation de surface redevient sableuse, avec des épisodes de dépôts vaseux très brefs. A la fin de la simulation, les 3 mailles présentent des hauteurs de sédiments différentes.



Figure VII-27 : Variabilité à l'échelle locale des érosions observées après de fortes tempêtes (décembre 2007) sur le banc de Lamouroux

La figure VII-28 représente l'évolution temporelle de la hauteur du sédiment, et de la fraction vaseuse, de deux « carottes numériques », pour la maille (98,79) et pour la maille (98,77). La composition de la couche initiale était sableuse. Malgré un léger dépôt de vase environ 1 mois après le début de la simulation, la composition de surface reste, essentiellement, sableuse jusqu'à l'installation des tables ostréicoles (2230 h, soit le 01/06/07). A partir de ce moment, il apparaît un dépôt continu de vase sur les trois mailles, sans apport de sable.

Les trois sites ne réagissent pas de la même manière aux vagues générées par les tempêtes de début décembre. Dans la maille 98,77, deux érosions se succèdent, correspondant aux deux tempêtes. Après ces événements, la sédimentation redevient sableuse. Lors de la seconde tempête, une couche fine de sable (en bleu) se dépose sur dans cette maille, empêchant l'érosion du sédiment vaseux. Dans la maille 98,79, la première tempête provoque une érosion de quelques millimètres d'épaisseur de la couche de vase. Très rapidement une couche de sable vient recouvrir les sédiments de surface. Par la suite, au cours de l'hiver, la sédimentation reste sableuse. Les sables sont *a priori* très facilement érodables, mais comme leur vitesse de chute est plus élevée que celle des particules fines, ils se redéposent très vite et se déplacent assez peu : l'interface peut, alors, rester sableuse, si elle est alimentée en sable. Ces résultats sont concordants avec les observations faites dans la partie VI-3.

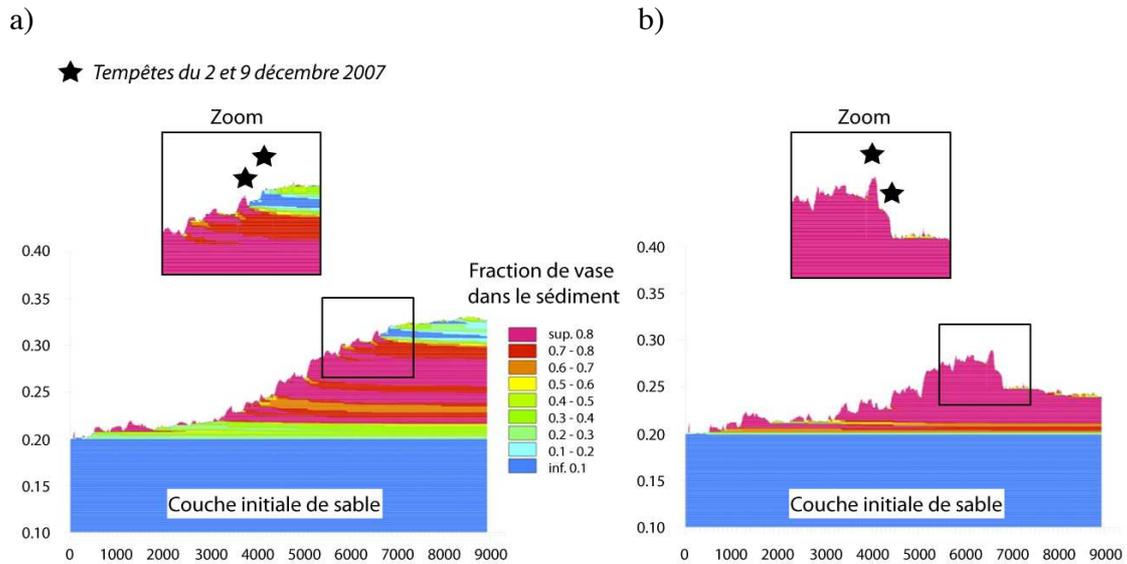


Figure VII-28 : Evolution temporelle de la hauteur du sédiment et de la fraction vaseuse de deux « carottes numériques » en présence de structures ostréicoles. a) pour la maille (98,79) et b) pour la maille (98,77). (période simulée, du 01/03/07 au 04/04/08)

La figure VII-29 montre l'évolution verticale de la nature du sédiment pour les mêmes mailles que précédemment, en l'absence des structures ostréicoles. Il apparaît que la sédimentation, sur le banc, est moins vaseuse au cours de l'année. La maille (98,79) montre toutefois une tendance plus vaseuse, peut-être liée à sa position centrale sur le banc. L'hiver, la pratique d'enlèvement des installations ostréicoles, apparaît intéressante pour réduire les envasements résiduels.

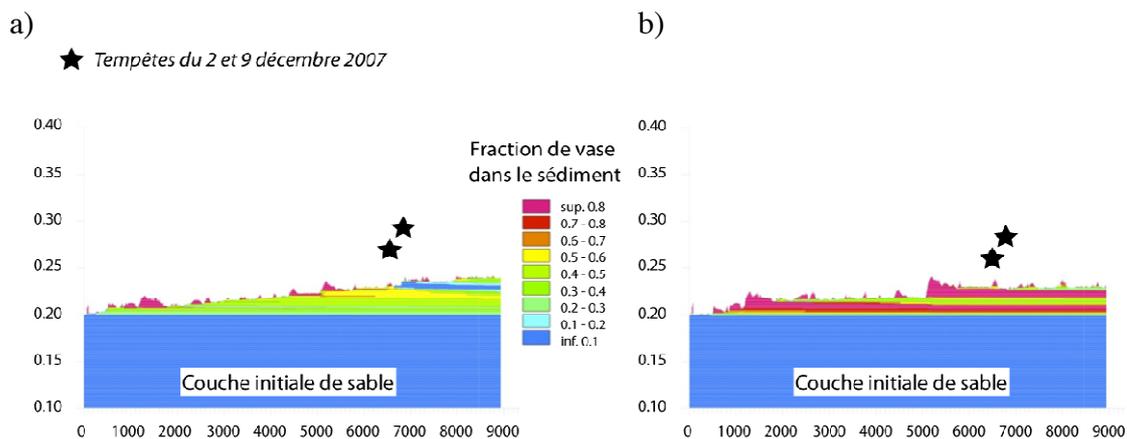


Figure VII-29 : Evolution temporelle de la hauteur du sédiment et de la fraction vaseuse de deux « carottes numériques » en l'absence de structures ostréicoles. a) pour la maille (98,79) et b) pour la maille (98,77). (période simulée, du 01/03/07 au 04/04/08)

VII-5. Conclusions

L'intégration de nouvelles données sur la turbidité, sur les caractéristiques des vagues, sur la nature des sédiments et sur les érosions/dépôts et l'utilisation des résultats issus de l'étude rhéophysique ont permis la modification de certains paramètres hydro-sédimentaires du modèle et l'amélioration des simulations des processus hydro-sédimentaires.

Les contraintes de cisaillement des vagues (τ_w) simulées sont souvent plus faibles en haut des estrans : cela peut résulter d'une surestimation des frottements sur le fond dans la modélisation des vagues. De même, certaines configurations de vents entraînent des erreurs dans le calcul des τ_w . Les zones où ces contraintes sont le mieux simulées, correspondent aux zones centrales du bassin.

Pour 12 mois simulés, le modèle reste constant dans la représentation des valeurs des concentrations moyennes, comme des amplitudes de variations. Un décalage entre les pics de turbidité simulée et mesurée peut apparaître de temps à autre, sur le bas de la vase de Brouage, en lien avec une cote du fond moyenne, dans la maille, supérieure à celle du point de mesure.

Toutefois, le calibrage du modèle en MES peut être considéré comme satisfaisant, tandis que la reproductibilité des contraintes de vagues sur le fond reste moyenne et pourrait être nettement améliorée par un passage à un calcul instationnaire des vagues.

Le modèle reproduit correctement les fractions résiduelles de vase en surface sur les zones intertidales, en été comme en hiver, du fait de l'utilisation de forçages réalistes, associés à de nouveaux paramétrages sédimentaires.

Le modèle montre un degré important de piégeage des sédiments sur la partie médiane de la vase de Brouage et plus modéré, dans les zones ostréicoles de la partie Nord de la baie. Les parties basses de la vase de Brouage seraient plutôt en érosion. Néanmoins, dans ces zones, cette constatation est à modérer car la dynamique du bouchon vaseux de la Charente dans le modèle reste à préciser.

Les hauts d'estrans (Est et Ouest) apparaissent plutôt stables et ne montrent pas d'accrétions importantes, tout comme la partie Sud de la baie. Ces résultats de simulation correspondent aux amplitudes altimétriques mesurées à l'aide des ALTUS.

La présence des installations ostréicoles entraîne des changements locaux dans la partie Nord du bassin, en induisant un envasement, tandis que la partie Sud du bassin semble moins affectée.

L'étude locale sur le banc de Lamouroux montre que les épaisseurs de sédiments vaseux piégés sous les tables ostréicoles sont très variables d'une maille à une autre. Ces variations peuvent être le résultat des modifications locales du courant par les tables, ou bien être liées aux variations bathymétriques. Le modèle simule une sorte de « sandwich » sédimentaire dans lequel les couches vaseuses sont intercalées entre des couches sableuses.

Ces résultats sont en accord avec les mesures et observations réalisées au cours de l'étude sédimentaire.

Partie VIII : Synthèse générale - discussion

Face aux évolutions anthropiques tant globales, liées au changement climatique, que relatives aux activités socio-économiques locales (conchyliculture, tourisme, aménagement du littoral, etc.), l'évolution des systèmes côtiers intègre à des fréquences variables plusieurs types d'actions et d'interactions entre différents processus (sédimentologiques, hydrodynamiques, biologiques). Pour comprendre les mécanismes d'érosions et de dépôts des sédiments, ainsi que la localisation des zones de transport et d'accumulation, il est important d'avoir une bonne connaissance de leurs caractéristiques, tant physiques que mécaniques. Il est nécessaire, également, d'identifier les forçages naturels ou anthropiques qui favorisent ou modifient la sédimentation. Les pratiques conchylicoles, l'aménagement du domaine public maritime et l'action de certains organismes benthiques ont un impact sur la stabilité des sédiments. Dans ce cadre, une stratégie d'étude à différentes échelles spatio-temporelles a été initiée pour mieux connaître la dynamique des sédiments fins et mixtes des zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron. Elle se décompose de la manière suivante :

- détermination des caractéristiques texturales et comportementales des sédiments de surface (*étude sédimentologique et rhéophysique*)
- caractérisation des forçages hydrodynamiques et anthropiques (*essentiellement l'ostréiculture*) et détermination de leurs conséquences sur la sédimentation (*étude des forçages*)
- concordance mesures-modèle et simulations numériques spécifiques (*modélisation appliquée*)

La combinaison d'une étude rhéophysique avec une étude hydro-sédimentaire est une voie possible pour améliorer les connaissances des interactions entre le fluide et le lit sédimentaire. Ainsi, dans cette étude, la démarche choisie s'appuie sur une association de plusieurs champs disciplinaires (hydrodynamique, sédimentologiques, mécanique des matériaux complexes et des fluides) et sur différentes approches méthodologiques (analyses en laboratoire, mesure *in situ* et modélisation numérique appliquée).

Cependant, dans cette étude, le lit sédimentaire n'a été caractérisé que par sa texture et sa rigidité, qui dépendent des conditions de sédimentation. Dans une stratégie d'étude « idéale », il serait important d'inclure d'autres paramètres tels que les processus biologiques (biostabilisation *versus* bioturbation) et les processus biogéochimiques (adsorption/relargage) qui peuvent avoir une influence sur le comportement mécanique des sédiments.

1. Etude sédimentologique et rhéophysique

Les sédiments superficiels (0-2 cm de profondeur) des zones intertidales de la baie ont été identifiés à partir de leurs caractéristiques physiques (texture et concentration) et mécaniques (seuil d'écoulement). Les échantillons sédimentaires, correspondant aux deux premiers centimètres superficiels, ont été prélevés sur de nombreux sites, au cours de plusieurs saisons contrastées. L'examen de cette fine couche de 2 cm permet de mieux prendre en compte les variations de texture représentatives de périodes courtes (marées), contrairement à un prélèvement par benne qui « gomme » ces variations. Cette étude, basée sur la rhéophysique, constitue une approche originale en environnement littoral, car cette double analyse, physique et mécanique, est rarement réalisée dans l'élaboration des classifications texturales des faciès sédimentaires. Elle a permis de mieux comprendre les spécificités des sédiments naturels soumis à des contraintes environnementales.

Les sédiments superficiels de la baie présentent une grande diversité de textures (sableuse, vaseuse et mixte) et d'états (fluide dilué, concentré à pâteux, consolidé). Les essais rhéophysiques ont permis d'estimer la valeur du seuil d'écoulement. Seuls les sédiments cohésifs ont été analysés après homogénéisation, car, les matériaux non-cohésifs et présentant une fraction de sable trop importante (supérieure à 60 %) sont difficilement analysables par la méthode choisie.

Les sédiments de la baie sont des mélanges complexes, apparentés à des fluides à seuil rhéofluidifiant, avec un seuil d'écoulement fortement dépendant à la fois des concentrations en vases (argile+silt) et en sables, ceci suivant deux modes texturaux bien marqués, et également en fonction de la structuration des mélanges.

Le rapport constant (0,17) entre les argiles et les silts atteste d'un transport commun dans la colonne d'eau des particules silteuses et argileuses par les courants tidaux du bassin de Marennes-Oléron. Cette donnée sédimentologique permet de caractériser la baie, en lui fournissant un indicateur « génétique », sorte d'empreinte sédimentaire unique qui la différencie des autres baies.

De ces analyses, cinq faciès sédimentaires ont pu être déterminés, l'évolution de la cohésion des sédiments de la baie étant directement dépendante de la fraction sableuse.

Les analyses rhéophysiques n'ont pas montré de différences sensibles entre les biodépôts des zones ostréicoles et les sédiments de la vasière de Brouage. Ces biodépôts sont le résultat d'un mélange entre les vases organiques riches en fèces et pseudofèces, et les vases inorganiques d'origine terrestre présentes dans la colonne d'eau. Il semble que l'enrichissement en matière organique dans les sédiments ne soit pas un facteur aussi déterminant que cela a pu être envisagé par Migniot (1989), et que les modifications apportées par cette dernière ne se distinguent pas du point de vue comportemental, des différents états structurels d'une vase pauvre en matière organique.

La connaissance de ces matériaux naturels et de leur localisation a permis d'établir des cartes sédimentaires saisonnières détaillées de l'interface (0-2 cm) des zones intertidales. Ces cartes complètent celles proposées par le SHOM, car elles sont à résolution verticale fine et intègrent à la fois les notions de comportement mécanique et de texture. La couverture sédimentaire de la partie Ouest de la baie évolue fortement au cours de l'année, en lien avec les variations des conditions hydrodynamiques, de l'activité ostréicole et en fonction de certains processus biologiques, notamment le développement des herbiers sur le haut de l'estran. En revanche, la partie Est de la baie garde une composition stable tout au long de l'année.

Cette étude constitue un préalable à d'autres travaux permettant de mieux relier le seuil d'écoulement apparent (τ_y) aux contraintes d'érosion des sédiments (τ_{ce}).

Cependant, il sera nécessaire, auparavant, d'approfondir les méthodologies de mesures rhéologiques, du fait qu'il s'agit de sédiments prélevés à l'émersion et remaniés lors de la préparation, alors que les techniques de détermination de la contrainte de fond, s'effectuant, sur un sédiment en place et immergé. Ainsi ces mesures sont discutables :

- la mesure du seuil d'écoulement dépend de la procédure d'essai et de l'appareillage. De plus, la notion de seuil étant subjective, sa définition doit être bien précisée et doit être absolument identique pour chaque étude.

- la mesure *in situ* de la contrainte de fond n'est opérationnelle que lorsqu'une lame d'eau d'une certaine épaisseur vient recouvrir l'interface. L'évaluation de cette contrainte repose sur des hypothèses qui doivent être discutées, notamment la rugosité du fond, qui est un paramètre déterminant pour l'ordre de grandeur de cette contrainte.

2. Etude des forçages hydrodynamiques et anthropiques, et stabilité des interfaces

La caractérisation des forçages hydrodynamiques et leurs impacts sur les sédiments de la baie ont été examinés grâce à une vaste expérimentation, *in situ*, avec le déploiement sur une année de 8 systèmes altimétriques capables d'enregistrer les variations verticales de l'interface sédimentaire et les conditions hydrodynamiques. Parallèlement, des analyses texturales et comportementales ont permis de quantifier les mécanismes contrôlant la sédimentation sur les zones intertidales de la baie. Enfin, un suivi bathymétrique d'un banc sableux, à vocation ostréicole (banc de Lamouroux) a également été réalisé par le LERPC-Ifremer, afin de connaître les facteurs faisant évoluer sa morphologie sur plusieurs années : Ce suivi a été pris en compte dans la présente étude afin de mieux préciser le rôle des installations ostréicoles sur la dynamique sédimentaire du banc, notamment la biodéposition résultante dans les sédiments.

Il est important de souligner que l'amélioration, ces dernières années, des technologies (enregistrement haute fréquence et haute résolution) et du traitement du signal, a conduit à une meilleure prise en compte des forçages naturels (Deloffre, 2005; Verney *et al.*, 2007). Cependant, malgré la bonne qualité et le grand nombre de résultats, il est nécessaire de préciser les limites de ces mesures, notamment du fait que les mesures altimétriques ne concernent qu'une toute petite surface sédimentaire, et sont difficilement extrapolables à l'ensemble d'un site. Le choix des sites est donc très important, car ces derniers doivent être les plus représentatifs de leur environnement sédimentaire.

De plus, la connaissance de la nature de l'interface, notamment de sa longueur de rugosité est également une question soumise à la discussion, du fait de son intervention dans le calcul des contraintes de frottements des vagues ou des courants sur le fond. Cette longueur dépend de plusieurs facteurs : taille des grains constituant l'interface ; taille et forme des aspérités de surface, liées ou non aux déplacements des grains ; forme du fond ; etc. Or, dans un environnement littoral, la morphologie et la composition du fond, peuvent changer rapidement.

Cette étude hydrosédimentaire *in situ* a permis la constitution d'une base de données unique. Ainsi, de nombreux mécanismes d'érosions/dépôts sont étudiés en prenant en compte différentes échelles de temps emboîtées (de la minute à l'année), afin d'appréhender le rôle respectif des paramètres hydrodynamiques (courants de marée, vagues) et biologiques (ostréiculture, herbiers). L'étude hydro-sédimentaire des zones intertidales de la baie permet de mieux comprendre les mécanismes des éventuels transferts sédimentaires amont-aval, l'action prépondérante des vagues au détriment de celle des courants de marée sur la stabilité des sédiments, mais également, l'influence du bouchon vaseux de la Charente, sur la dynamique de la vase et l'influence des pratiques ostréicoles sur la sédimentation. La

comparaison intra et inter platiers intertidaux montre des séquences sédimentaires spécifiques à chaque site.

Ainsi, les vagues sont le principal agent remobilisateur des sédiments fins, leur influence se faisant ressentir jusque sur les parties hautes des estrans. Du fait que les contraintes de frottement induites peuvent atteindre des valeurs supérieures à 2 N/m² lors d'épisodes tempétueux, ces vagues sont responsables d'érosions centimétriques dans les sédiments mixtes et vaseux, sur le haut et sur le bas des estrans. Après plusieurs jours d'action, il leur est possible d'affecter en profondeur les sédiments en cours de consolidation en modifiant leur structure interne, facilitant ainsi les érosions en masse. Selon le type de platier, ces mécanismes s'arrêtent lors de l'atteinte d'une couche vaseuse consolidée (cas de la vasière de Brouage) ou du fait d'un apport sableux postérieur jouant le rôle d'une couche protectrice pour les sédiments sous-jacents (cas de l'estran occidental et des bancs centraux). Cette protection serait due à la chute très rapide des sables lorsqu'ils sont remaniés.

Les courants de marée, quant à eux, agissent, quotidiennement, sur le transport des sédiments superficiels fluides, appelés « mollin ». Il s'en déduit que les échanges « court terme », entre le bas et le haut des estrans intertidaux de la baie, ne sont pas les mêmes sur la partie Est et sur la partie Ouest. Ainsi, sur la vasière, les courants sont responsables d'un transport sédimentaire perpendiculaire à la côte ('cross shore'), conduisant à une décantation des MES sur le haut de la vasière à l'étalement de marée haute : les particules sont canalisées par les réseaux de seillon et de ruissons, et leur décantation provoque des dépôts quotidiens de mollin de quelques millimètres, qui sont érodées au jusant suivant et conduits au bas de la vasière. Sur l'estran occidental, le transport sédimentaire est différent, du fait de courants de marée quasiment parallèles à la côte, mais, aussi, en raison d'une disponibilité en mollin, plus faible, réduisant alors les échanges entre le haut et le bas.

A l'échelle de l'année, la vasière de Monportail-Brouage et l'estran Ouest, montrent des transformations sédimentaires différentes. D'une part, la vasière ne présente pas de changement texturaux dans l'année et son évolution verticale dépend à la fois de l'intensité des vagues, mais également de l'expulsion du bouchon vaseux de la Charente. Les variations verticales y sont pluri-centimétriques à décimétriques. Au printemps et en été, les vents d'Ouest lèvent régulièrement des vagues qui vont maintenir la partie basse de la vasière en érosion constante, tandis qu'après une période automnale sans effet sensible, lors des premières crues hivernales, le bouchon vaseux viendrait alimenter en mollin la vasière, compensant les érosions hivernales liées aux vagues. Sur la partie haute, les érosions sont moins importantes, cette zone apparaissant comme plutôt stable. D'autre part, sur la partie haute de l'estran occidental, l'évolution des fonds sédimentaires est conditionnée par l'importance du développement des herbiers à zostères, constituant en été un frein hydraulique, et se traduit par un piégeage temporaire de particules fines, libérées en hiver, à la faveur du déclin des herbiers. Sur le bas de l'estran, la sédimentation, en l'absence d'ostréiculture, dépend du transport long-shore sableux en provenance des plages Nord, initié sous l'action des vagues. Ces deux zones apparaissent comme relativement stables à l'échelle annuelle et présentent des variations altimétriques centimétriques à court terme. Les figures VIII-1 et VIII-2 synthétisent l'ensemble des processus hydro-sédimentaire qui ont été décrits.

Du fait de l'importance de l'ostréiculture en baie de Marennes-Oléron, les surfaces qui lui sont dédiées représentent près de 20% des zones intertidales, ce qui induit, notamment dans les bancs sableux centraux un envasement progressif par biodéposition ou piégeage de suspensions en été. L'intensité des premières tempêtes hivernales a un impact important sur la

stabilité des biodépôts, dont l'énergie libérée sur le fond, peut conduire à des phénomènes de liquéfaction et d'érosion en masse des sédiments en cours de consolidation.

A l'échelle de plusieurs années, et compte-tenu de la gestion actuelle des installations ostréicoles au rythme des saisons, la sédimentation du banc de Lamouroux est, avant tout, conditionnée par les variations des vagues, alors que l'implication des huîtres et des courants de marée sur l'exhaussement des fonds apparaissent comme des facteurs secondaires. Un schéma de fonctionnement du banc est proposé (fig. VIII-3). En été, la présence des huîtres et des tables ostréicoles favorise un envasement progressif, puis, au cours de l'hiver, de violentes tempêtes affectant la baie, les dépôts vaseux sont partiellement, voire totalement, érodés par l'action des vagues, des apports sableux pouvant aussi recouvrir les dépôts vaseux. Ce sable bloque l'érosion potentielle des dépôts de vase sous-jacents, les biodépôts présents étant alors pris en « sandwich » entre des couches sableuses. Ce cycle semble se répéter chaque année, dans des proportions variables, en fonction des forçages hydrodynamiques et en fonction de la productivité des huîtres.

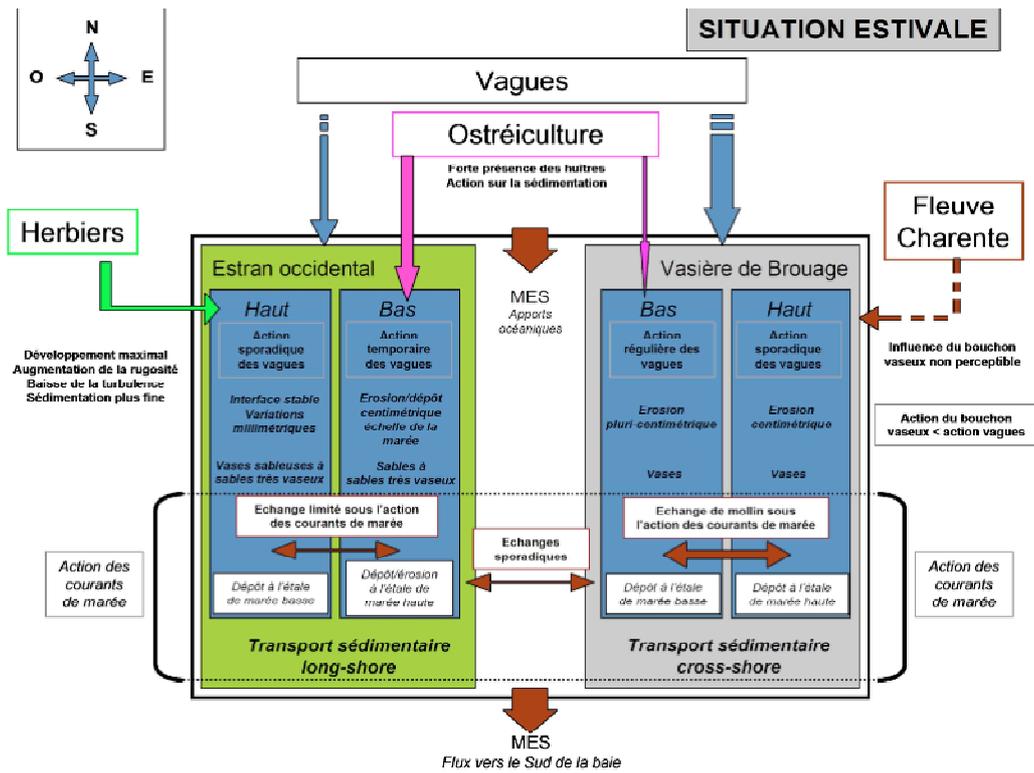


Figure VIII-1 : Schématisation du fonctionnement hydro-sédimentaire des estrans Est et Ouest en été

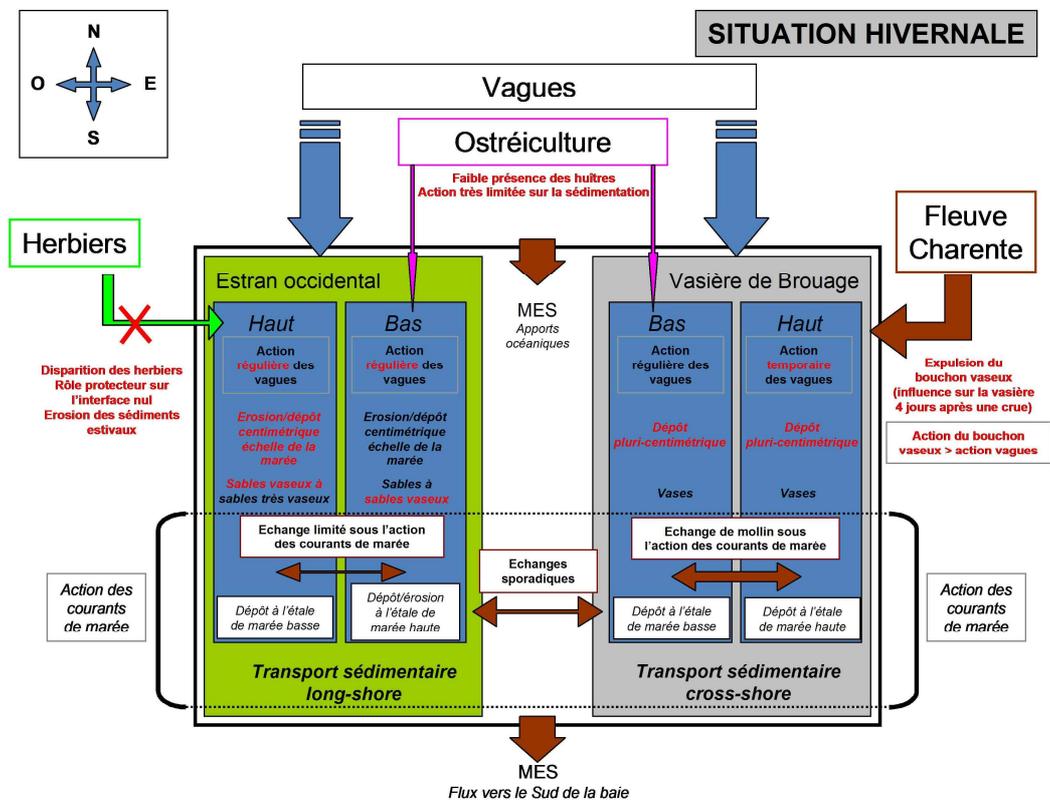


Figure VIII-2 : Schématisation du fonctionnement hydro-sédimentaire des estrans Est et Ouest en hiver

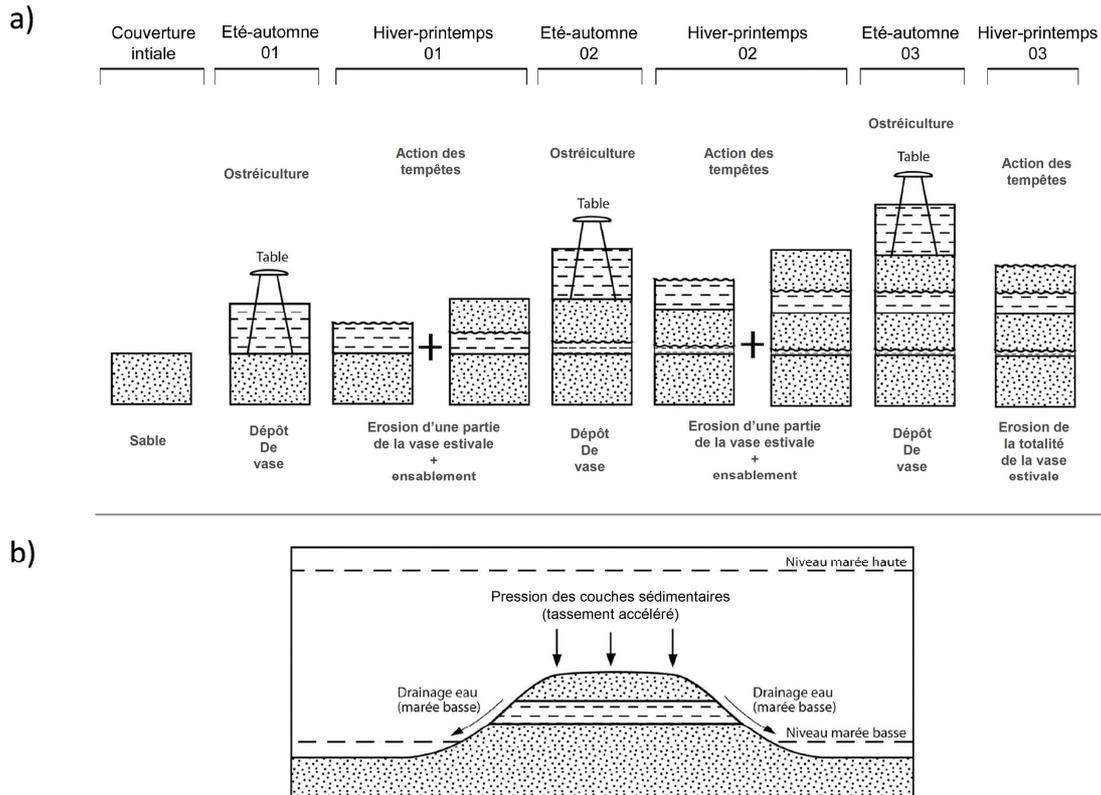


Figure VIII-3 : Schématisation (a) du cycle sédimentaire sur le banc de Lamouroux et (b) de l'action des couches sédimentaires supérieures sur le drainage des eaux interstitielles des sédiments vaseux

3. Modélisation appliquée

L'utilisation du modèle SiAM, permet de (1) se projeter à une échelle régionale et d'apprécier les circulations des matières en suspension (MES) au cours des marées et des tempêtes, (2) identifier rapidement, dans la baie, les zones de stockage, de transit, ou encore celles en érosion. Au début de cette étude, la précédente validation du modèle était basée sur des mesures de courant par profileur ADCP réalisées par l'Ifremer, dans le cadre du réseau REPER de la région Poitou-Charentes. La validation des MES reposait sur des échantillonnages temporels très limités, et seulement sur trois enregistrements de sonde de turbidité d'une dizaine de jours.

A partir de la nouvelle étude hydro-sédimentaire, une base de données de terrain, a été constituée ; elle complète substantiellement la précédente. L'étude rhéophysique a également permis la modification de l'expression de la contrainte critique d'érosion dans le modèle, en prenant comme hypothèse, comme l'avait fait Migniot (1989), que la contrainte critique d'érosion des vases varie proportionnellement au seuil d'écoulement. Ces deux études autorisent un nouveau calibrage, du point de vue des contraintes de cisaillements sur le fond induits par les houles et du point de vue du transport des sédiments fins, du modèle numérique SiAM-2DH (Ifremer) implanté sur la baie de Marennes-Oléron. La simulation retenue couvre une période de plus d'un an, avec des forçages de marée et de vents réalistes. Malgré quelques écarts concernant les contraintes de frottement des vagues sur le fond, liés au mode de calcul stationnaire des vagues, le modèle s'avère capable de reproduire de manière satisfaisante les concentrations de matières en suspensions près du fond en périodes calmes (sans vagues) et

en périodes agitées (avec vagues). Le modèle est également capable de simuler la variabilité temporelle et la diversité des faciès rencontrés, en concordance avec les observations sur les différentes parties de la baie.

Les écarts entre observations et résultats des simulations sont attribués à plusieurs facteurs parmi lesquels : (i) la forte instationnarité (non simulée) des vagues lors de l'évolution du vent ; (ii) le changement d'état du fond sédimentaire (changement de rugosité, voire effet de liquéfaction du fond pouvant entraîner un amortissement des vagues et une érosion plus aisée) ; (iii) une schématisation trop grossière des houles du large simulées (en particulier lorsque ces dernières ont une direction différente de celle supposée dans la modélisation schématique) ; (iv) les écarts bathymétriques qui jouent un rôle essentiel dans le calcul de la contrainte de fond lorsque les hauteurs d'eau sont faibles.

De même, l'initialisation de la couverture sédimentaire basée sur la carte du S.H.O.M conduit également à des biais, car elle introduit une spatialisation réaliste des sédiments, mais seulement au début de la simulation. Après plusieurs mois de simulation, les modifications de rugosité liées au changement de nature du sédiment superficiel ne sont pas prises en compte.

Néanmoins, le calibrage du modèle sur cette nouvelle base apparaît donc comme prometteur, et fidèle aux mesures rhéologiques qui deviennent donc élément de calibration du modèle.

Suite à cette validation en l'état, plusieurs simulations ont été réalisées avec et sans les installations ostréicoles, en considérant les pratiques actuelles d'enlèvement et de pose des tables. Leur comparaison permet de mieux comprendre les effets de l'ostréiculture :

- A l'échelle régionale, les huîtres et les installations entraînent peu de changements de faciès sédimentaires et l'envasement ne semble pas augmenter de manière significative.
- A l'échelle locale, leur impact est plus marqué : un piégeage de particules fines est effectif dans les zones ostréicoles de la partie Nord de la baie, modifiant la nature des sédiments superficiels, alors que, dans la partie Sud de la baie, il y a très peu de différences entre les simulations, avec et sans tables ostréicoles.

Le modèle simule également les érosions des sédiments piégés à proximité des tables ostréicoles (biodépôts et suspensions piégées) sous l'action des vagues et révèle aussi un possible rôle protecteur des sables sur ces couches de vases. Globalement, à l'échelle d'une année et avec un enlèvement saisonnier réaliste des tables ostréicoles, l'impact faible des biodépôts dans le changement textural et comportemental de la colonne sédimentaire superficielle, indique également, comme le montrent les observations et les mesures *in situ*, que le rôle des apports directs des huîtres (fèces et pseudofèces) est à relativiser.

Dans les deux simulations, le modèle confirme la relative stabilité, d'une part du platier occidental et, d'autre part, de la partie haute de la vasière de Brouage. En revanche, il semble que les érosions observées en bas de la vasière soient surestimées dans le modèle, peut-être en raison d'une mauvaise reproduction de la Charente et de la dynamique de son bouchon vaseux.

Conclusions et perspectives

Conclusions

L'objectif principal de cette thèse était d'étudier le fonctionnement de la dynamique sédimentaire des zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron, qui représente 60 % de la superficie totale. Elle s'intègre dans un programme global de recherche finalisée et d'aide à la décision pour la compréhension et la gestion environnementale de la baie, menée par différents partenaires ; le Conseil Général de la Charente Maritime, les professionnels de l'ostréiculture et l'Ifremer.

Deux stratégies d'étude ont été mises en œuvre :

- l'une pour préciser la nature et l'état des matériaux superficiels des zones intertidales, à partir d'essais granulométriques et rhéophysiques, réalisés en laboratoire, sur des échantillons prélevés dans des sites caractéristiques, lors de deux saisons contrastées,
- l'autre pour identifier les conditions de remise en suspension et de transport des sédiments, pour différentes échelles spatio-temporelles à partir d'une vaste campagne d'expérimentation *in situ*, s'étant déroulée sur 12 mois.

L'étude sédimentologique fine des sédiments superficiels (0-2 cm) a mis en évidence la grande diversité texturale (sableuse, vaseuse et mixte) et d'état structural (fluide peu à fortement concentré) des sédiments des zones intertidales de la baie. Cinq faciès sédimentaires caractéristiques ont pu être identifiés, en prenant en compte à la fois la texture, la concentration volumique et le seuil d'écoulement. Les sédiments fins, à mélange binaire (vase et eau) ont un comportement dépendant de la teneur en eau (*i.e* la concentration), induisant donc indirectement ses possibilités de remise en suspension lors de l'immersion. Les sédiments mixtes constituent un mélange ternaire (vase, sable et eau), dans laquelle la concentration en fines conditionne la valeur initiale du seuil d'écoulement, qui est augmentée par l'ajout de grains, la teneur en sable ne devant pas excéder 60%. Toutefois, l'effet des interactions de contact intragranulaire n'a pas été totalement identifié, notamment le rôle de la polydispersité des grains.

Les cartes sédimentaires saisonnières, élaborées à partir de ces informations et des observations de terrain, montrent que la partie Ouest de la baie, ainsi que les bancs centraux, subissent de profonds changements de faciès au cours de l'année, alors que la vasière de Monportail-Brouage reste stable, confirmant ainsi, pour cette dernière, les conclusions des travaux antérieurs. La répartition de ces faciès sédimentaires dans la baie est conditionnée par la morphologie du bassin, mais aussi par la nature et l'importance des forçages hydrodynamiques et anthropiques. L'étude hydro-sédimentaire, sur plusieurs échelles temporelles, a permis d'améliorer les connaissances sur les processus physiques et biologiques régissant la stabilité des sédiments superficiels des zones intertidales de la baie. L'ensemble des mécanismes d'érosions/dépôts (de la minute à l'année), ainsi que les rôles respectifs des forçages hydrodynamiques (courants de marée, vagues) et des forçages biologiques (ostréiculture, herbiers) sur les variations de hauteurs des sédiments ont été décrits et quantifiés. Ainsi, l'action des vagues est prépondérante sur celle des courants, quant à la remise en suspension des sédiments fins et mixtes de la partie Nord de la baie (représentant ces 2/3), les échanges amont-aval, essentiellement de « mollin », étant régis par les courants de marée.

L'effet du bouchon vaseux de la Charente sur la sédimentation de la vasière est en partie démontré : en effet, les apports de matières en suspension semblent contrecarrer les érosions

liées à l'action des vagues. Le rôle saisonnier des herbiers de l'Ouest sur le piégeage des sédiments fins, et donc sur les changements de faciès sédimentaires, semble également important. L'étude locale au banc ostréicole de Lamouroux a permis d'apprécier et de quantifier l'envasement lié à l'activité ostréicole. L'enlèvement saisonnier des tables à huîtres permet de limiter les dépôts vaseux et sableux résiduels, cette pratique obligatoire dans certaines parties de la baie devant être généralisée dans toutes les zones exposées aux vagues.

Cette vaste campagne de mesures avait également pour objectif d'apporter des éléments pour améliorer le calage du modèle SiAM-2D, appliqué à la baie de Marennes-Oléron. Ainsi en s'appuyant sur les nombreuses mesures *in situ*, des modifications de certains paramètres sédimentaires ont été réalisées, afin de réaliser des simulations réalistes en considérant la présence ou non des tables ostréicoles. La modification des paramétrages hydro-sédimentaires a permis de simuler des turbidités en périodes calmes relativement satisfaisantes, alors que la stratégie adoptée pour la simulation de l'effet des vagues est apparue moins satisfaisante, du fait d'un choix de calcul stationnaire des houles. De même, la variabilité saisonnière de la nature des sédiments de surface, mise en évidence sur les cartes sédimentaires, a été également reproduite, particulièrement sur l'estran occidental, ainsi que l'impact des tables ostréicoles sur la sédimentation du banc de Lamouroux. Dans certaines zones de la baie, le modèle peut quasiment prétendre un caractère prédictif, notamment en ce qui concerne l'influence de l'ostréiculture sur la sédimentation dans les parties basses des estrans et sur les bancs centraux. Les prochaines campagnes de mesures sur la baie pourront s'appuyer sur les résultats des simulations pour optimiser leurs stratégies d'études.

Perspectives de recherche

La présente étude conduit ainsi à établir que la baie semi-fermée de Marennes-Oléron est un environnement très complexe, d'un point de vue hydrodynamique et d'un point de vue sédimentaire, avec une variabilité saisonnière marquée de la surface. Même si d'importants moyens de mesures ont été mobilisés dans cette étude, de nombreuses zones d'ombres persistent, qui pourraient être éclaircies par les quelques pistes de réflexion suivantes :

- ➔ l'approfondissement expérimental de ou des loi(s) de comportement des sédiments fins et mixtes, notamment, l'appréciation du seuil d'écoulement, ainsi que la détermination des propriétés viscoélastiques. Des études ciblées sur le remaniement, la fatigue et la liquéfaction des matériaux mixtes pourraient également être menées, ainsi que concernant le rôle dû aux fractions organiques particulaire et dissoute ;
- ➔ l'amélioration des connaissances des conditions d'agitation des sédiments lors de la remise en eau, afin de corréliser la période du prélèvement à l'émersion (échantillon intact/remanié) et celle de la prise de mesure avec une lame d'eau surnageante : ainsi, des observations en canal hydrodynamique couplées à des mesures rhéologiques des matériaux de l'interface pourraient permettre l'établissement de la relation devant exister, entre les conditions du forçage et l'état du sédiment, dont le comportement est gouverné par les cycles immersion-émersion ;
- ➔ la connaissance précise du comportement et du profil de concentration de l'interface mobile (vase fluide) qui est cruciale pour la validation des modèles numériques 3D : en effet, cette dernière, caractérisée par de fortes concentrations en MES, revêt une étendue à l'immersion difficile à déterminer. L'utilisation d'appareils de mesures de

turbidité (ASM-IV) capables de mesurer très finement ses gradients de concentrations, couplés à des courantomètres (ADV) et des altimètres *in situ* (ALTUS), permettrait de mieux comprendre le comportement de cette couche sous l'effet de la turbulence.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Les sources d'erreurs liées aux mesures rhéologiques expérimentales

Les mesures réalisées à l'aide de rhéomètres exigent beaucoup d'attention (Toorman, 1994). De nombreux phénomènes liés à la composition des matériaux étudiés peuvent perturber et modifier la mesure. Les phénomènes principaux sont cités ci-après.

Glissements aux parois : C'est le phénomène le plus courant et le plus grave. Il apparaît lorsque l'on utilise des géométries lisses. Il peut se produire une diminution de la concentration en matière solide près des parois. Cela entraîne une « lubrification » des particules proches des parois. L'hypothèse de continuité du milieu n'est plus respectée (fig.19). Dans certains cas, ce glissement s'accompagne de l'éjection de particules.

Il y'a donc, à contrainte égale, une augmentation de la contrainte de cisaillement près de la paroi, par rapport au reste du matériau. On observe alors une viscosité plus faible que la viscosité réelle. Il est possible d'éviter ce phénomène par l'utilisation de géométrie à surface rugueuse, qui empêchera la chute de densité près des parois (fig. A-1).

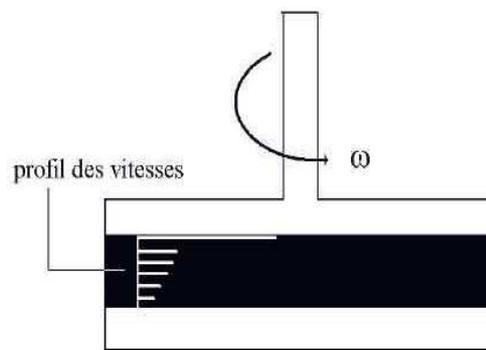


Figure A-1 : Profil schématique des vitesses lorsqu'un glissement à la paroi se produit avec une discontinuité au niveau de la paroi

Fracturation : Le phénomène de fracturation apparaît lorsque le matériau étudié est hétérogène. Le cisaillement ne s'effectue pas de manière homogène, comme dans lors d'un glissement aux parois. Il apparaît une surface de discontinuité dans le matériau et pas aux parois (Magnin et Piau, 1990). Le matériau se retrouve alors scindé en deux parties, dont une est solidaire de la géométrie et donc entraînée à la même vitesse (fig. A-2).

Ce phénomène a pour conséquence une sous-estimation de la viscosité du matériau. Il est difficile de s'affranchir d'un tel phénomène. Baudez (2001) a montré l'existence de fracturation, dans des boues résiduelles, pour des teneurs en eau inférieures à 75% environ. C'est à dire des matériaux s'approchant d'une consistance « solide ».

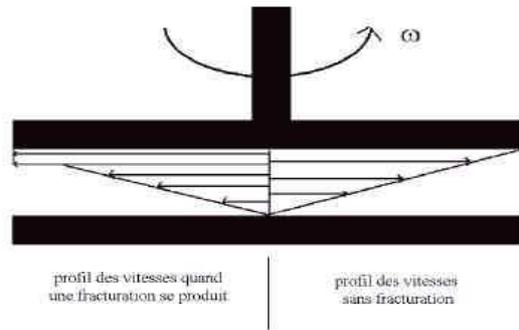


Figure A-2 : Représentation schématique du profil des vitesses lorsqu'une fracturation se produit (à gauche) par rapport au profil théorique (à droite)

Creusement : Il y a creusement lorsque, dans certaines conditions, la périphérie de l'échantillon se rétracte vers l'intérieur. Ce creusement varie suivant la vitesse de rotation et la durée de l'essai. L'essai se fait alors sur une surface de sédiment plus petite que celle initiale. (fig. A-3)

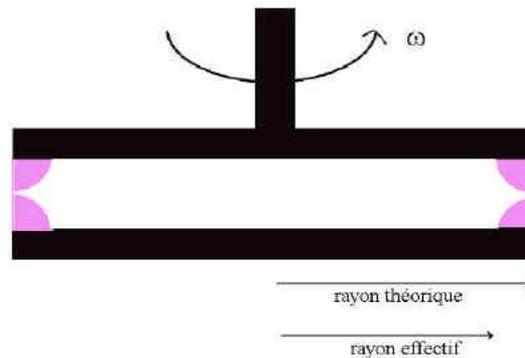


Figure A-3 : Le creusement à la périphérie. Le rayon effectif est inférieur ($R-e$) au rayon théorique (R)

Il est alors impératif de tenir compte du volume réel cisailé et non du volume théorique :

$$\dot{\gamma} = 2\pi \frac{R-e}{C} n$$

$$\tau_{réel} = \frac{3C}{2\pi(R-e)^3}$$

où e est le creusement mesuré à la périphérie, R le rayon de la géométrie.

Dans certains cas, un creusement peut entraîner une erreur de 100% sur les mesures. Il peut arriver que des phénomènes de migration de particules accompagnent ce phénomène. Si le creusement devient trop important, il peut complètement séparer en deux l'échantillon. On se retrouve alors dans le cas d'une fracturation (Coussot et Ancey, 1999a).

Evaporation : Des problèmes d'évaporation peuvent apparaître pour des suspensions dont la teneur en eau est importante. Ce type de phénomène engendre deux effets opposés dont il faut

tenir compte. Soit le volume total du matériau cisailé diminue, ce qui a pour conséquence d'abaisser la viscosité mesurée. Soit la viscosité du matériau restant augmente, par augmentation de la fraction solide. Plus le rapport entre les surfaces libres et le volume du matériau est grand, plus l'évaporation est importante. Un certain nombre de techniques permettent de s'affranchir de ce phénomène (saturation de l'air ambiant, film liquide sur les surfaces libres).

Sédimentation : La sédimentation apparaît lorsque des particules de densité différente migrent pendant l'expérience à l'intérieur du fluide interstitiel sous l'effet de l'apesanteur. On observe une accumulation de particules plus denses dans la partie basse du matériau. L'hypothèse d'homogénéité du matériau cisailé n'est plus respectée. Il est possible de contre-carrer ce phénomène en réinjectant dans le matériau ou bien en ne mesurant que la fraction de suspension qui reste homogène.

Migration : La migration est une variante de la sédimentation. Elle se différencie de cette dernière par le fait que le déplacement des particules au sein du matériau n'est pas lié à l'action de l'apesanteur. Elle est le résultat de l'inertie et de l'hétérogénéité du gradient de vitesse. Cependant, ce phénomène semble peu affecter les géométries plan-plan (Krishnan *et al.*, 1996).

ANNEXE 2 : Caractéristiques des vents enregistrées au phare de Chassiron (île d'Oléron), entre le 1^{er} avril 07 et le 1^{er} mars 2008

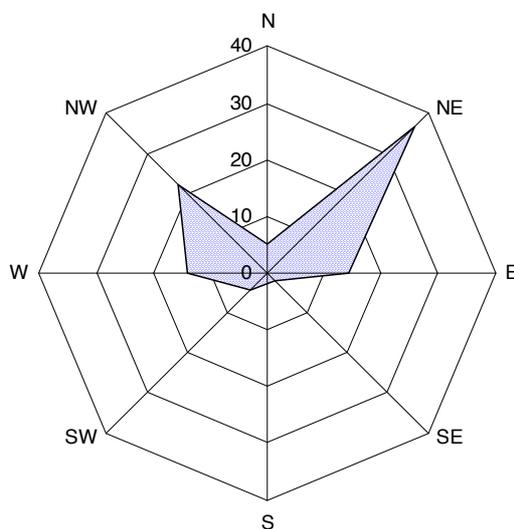
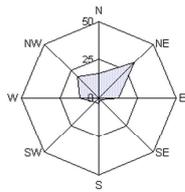
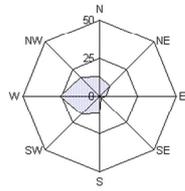
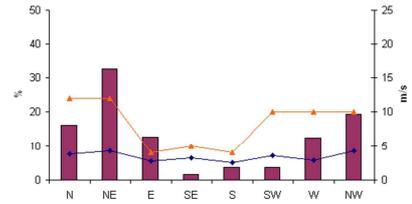


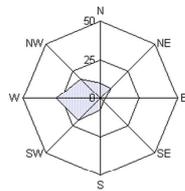
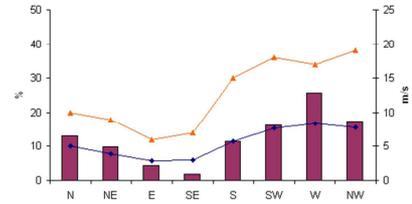
Figure A-4 : Répartition annuelle des directions des vents entre le mois d'avril 2007 et le mois de mars 2008



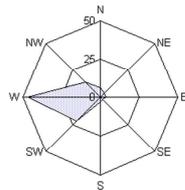
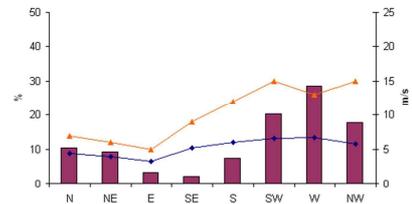
av-07	Nombre d'heures	pourcentage	vitesse moyenne	max
Nombre d'heures totale	648	100		
N	104	16	3,8	17
NE	210	32	4,3	12
E	62	13	2,8	4
SE	11	2	3,2	5
S	24	4	2,5	4
SW	24	4	3,6	10
W	80	12	2,9	10
NW	126	19	4,2	10



mai-07	Nombre d'heures	pourcentage	vitesse moyenne	max
Nombre d'heures totale	744	100		
N	97	13	5,1	10
NE	74	10	3,9	9
E	32	4	2,9	6
SE	13	2	2,9	7
S	86	11	5,7	15
SW	121	16	7,7	18
W	191	26	8,4	17
NW	130	17	7,8	19



juin-07	Nombre d'heures	pourcentage	vitesse moyenne	max
Nombre d'heures totale	720	100		
N	75	10	4,5	7
NE	67	9	3,9	6
E	25	3	3,3	5
SE	17	2	5,3	9
S	55	8	6,1	12
SW	147	20	6,6	15
W	205	29	6,8	13
NW	129	18	5,8	15



juil-07	Nombre d'heures	pourcentage	vitesse moyenne	max
Nombre d'heures totale	744	100		
N	45	6	3,6	7
NE	25	3	3,3	6
E	28	4	3,6	6
SE	14	2	4,5	8
S	21	3	4,8	11
SW	160	22	7,6	16
W	348	47	7,1	15
NW	102	14	4,6	13

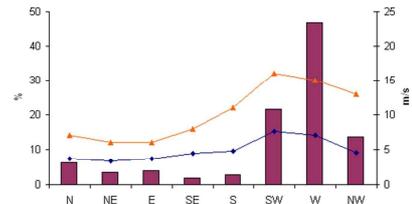
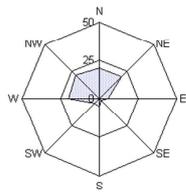
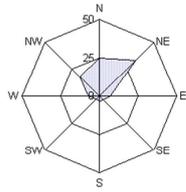
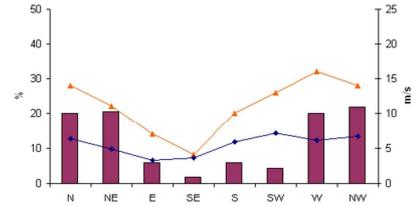


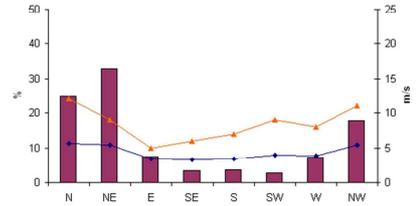
Figure A-5 : Répartition mensuelle des directions et des intensités des vents entre le mois d'avril 2007 et le mois de juillet 2007



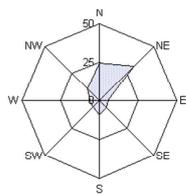
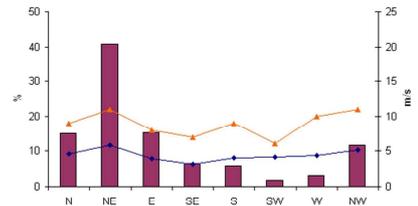
août 07				
Nombre d'heures totale	Nombre d'heures	pourcentage	vitesse moyenne	max
N	149	20	6,3	14
NE	152	20	4,9	11
E	43	6	3,3	7
SE	13	2	3,6	4
S	43	6	5,9	10
SW	32	4	7,1	13
W	149	20	6,1	16
NW	163	22	6,6	14



sept 07				
Nombre d'heures totale	Nombre d'heures	pourcentage	vitesse moyenne	max
N	179	25	5,6	12
NE	237	33	5,4	9
E	53	7	3,4	5
SE	25	3	3,3	6
S	26	4	3,4	7
SW	20	3	4,0	9
W	52	7	3,8	8
NW	126	18	5,4	11



oct 07				
Nombre d'heures totale	Nombre d'heures	pourcentage	vitesse moyenne	max
N	112	15	4,6	9
NE	304	41	5,9	11
E	113	15	3,9	8
SE	48	6	3,1	7
S	44	6	4,1	9
SW	14	2	4,1	6
W	23	3	4,4	10
NW	86	12	5,2	11



nov 07				
Nombre d'heures totale	Nombre d'heures	pourcentage	vitesse moyenne	max
N	175	24	5,3	11
NE	227	32	5,6	12
E	42	6	3,1	5
SE	46	6	4,3	10
S	66	9	5,9	13
SW	42	6	4,7	7
W	44	6	4,9	11
NW	78	11	4,8	13

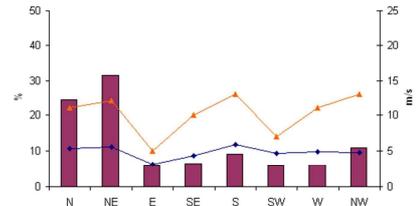
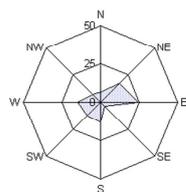
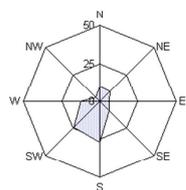
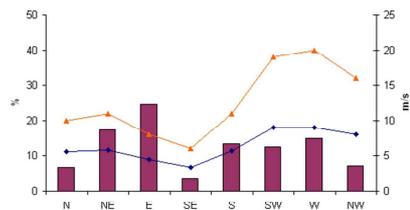


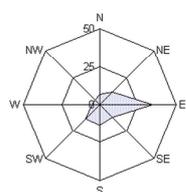
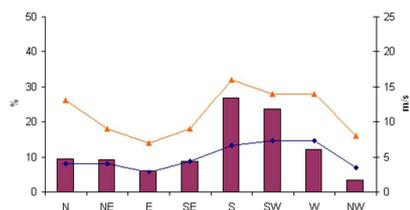
Figure A-6 : Répartition mensuelle des directions et des intensités des vents entre le mois d'août 2007 et le mois de novembre 2007



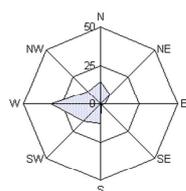
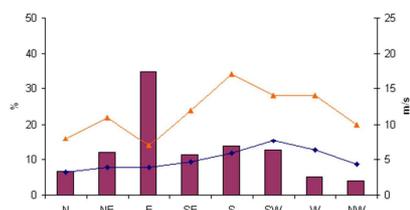
dir-07	Nombre d'heures	pourcentage	vitesse moyenne	max
Nombre d'heures totale	744	100		
N	50	7	5,6	10
NE	129	17	5,8	11
E	183	25	4,4	8
SE	27	4	3,3	6
S	100	13	5,7	11
SW	92	12	9,0	19
W	110	15	9,0	20
NW	53	7	8,0	16



janv-08	Nombre d'heures	pourcentage	vitesse moyenne	max
Nombre d'heures totale	714	100		
N	69	10	4,1	13
NE	67	9	4,2	9
E	44	6	2,8	7
SE	64	9	4,5	9
S	191	27	6,7	16
SW	168	24	7,4	14
W	87	12	7,3	14
NW	24	3	3,6	8



févr-08	Nombre d'heures	pourcentage	vitesse moyenne	max
Nombre d'heures totale	696	100		
N	46	7	3,2	8
NE	83	12	3,9	11
E	242	35	3,9	7
SE	78	11	4,7	12
S	95	14	5,8	17
SW	88	13	7,7	14
W	36	5	6,3	14
NW	28	4	4,3	10



mars-08	Nombre d'heures	pourcentage	vitesse moyenne	max
Nombre d'heures totale	744	100		
N	111	15	9,2	16
NE	66	9	7,3	11
E	23	3	3,8	7
SE	7	1	4,4	7
S	83	13	5,8	22
SW	116	16	7,3	16
W	241	32	9,2	18
NW	88	12	8,2	15

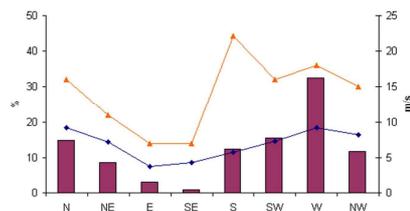


Figure A-7 : Répartition mensuelle des directions et des intensités des vents entre le mois de décembre 2007 et le mois de mars 2008

ANNEXE 3 : Enregistrements des variations altimétriques et caractéristiques des vagues sur le site n°7 (Perquis)

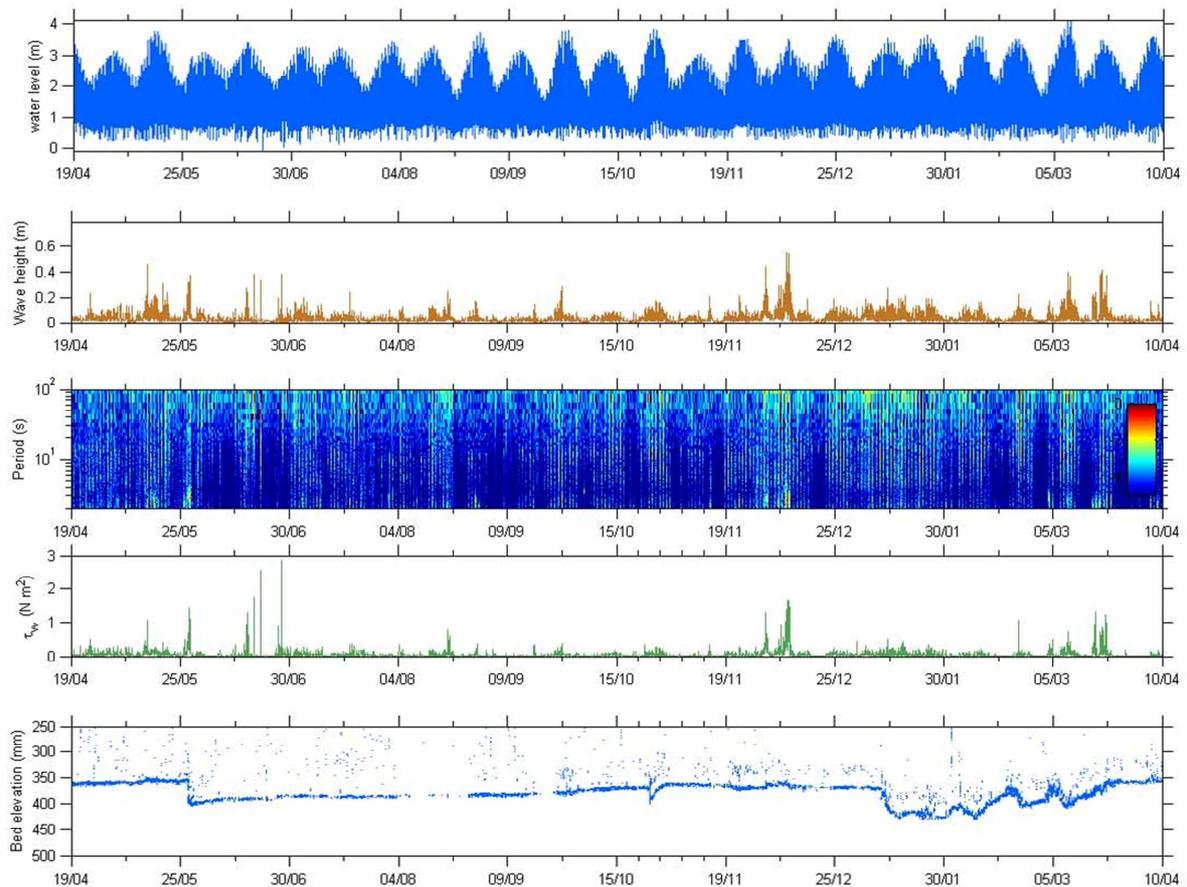


Figure A-8 : Enregistrements des caractéristiques des vagues et des mouvements de l'interface sédimentaire sur le banc de Perquis (site n°7), entre le 15/04/07 et le 10/04/08 (à partir d'un ALTUS)

ANNEXE 4 : Enregistrements des caractéristiques des courants, en période sans vagues, sur le site n°4 (Lamouroux)

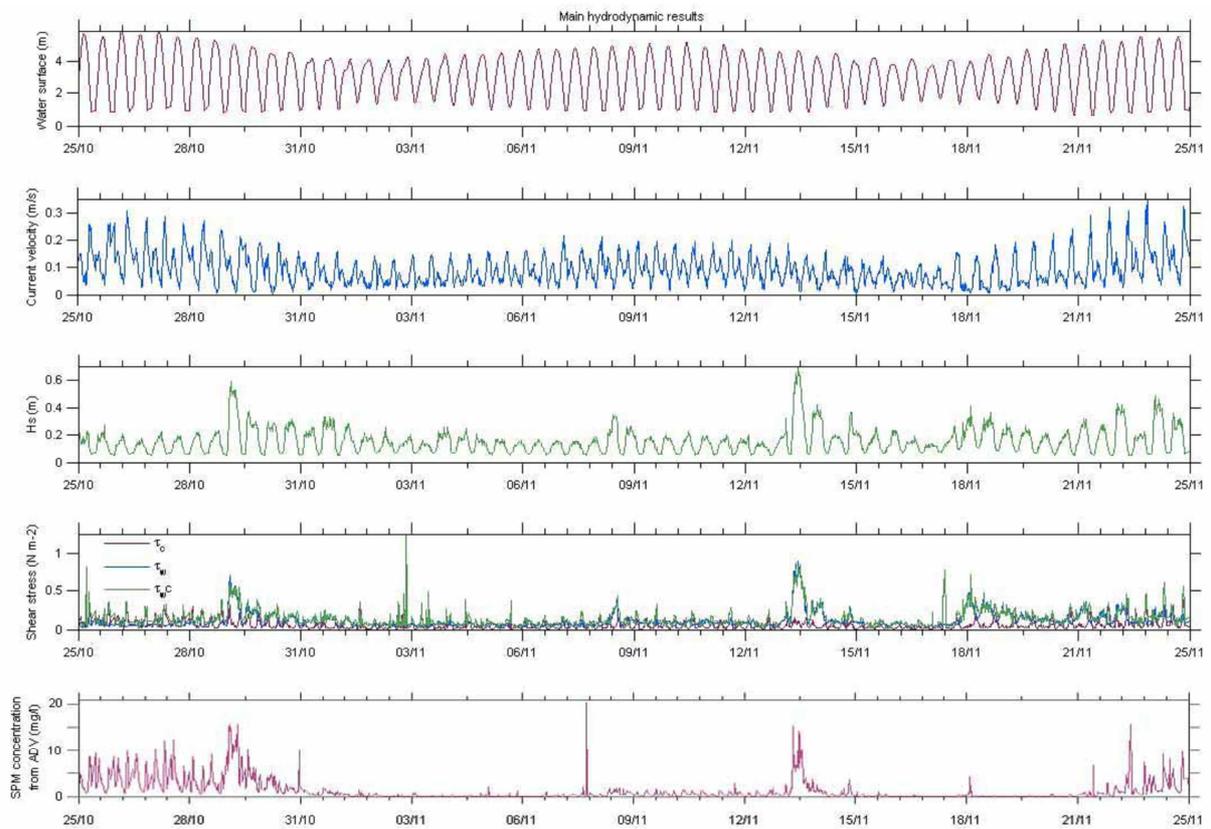


Figure A-9 : Enregistrements des caractéristiques des courants de marée, des vagues et de la turbidité, sur le banc de Lamouroux, entre le 25/10/07 et le 25/11/07(à partir d'un ADV)

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

FIGURES

Partie I

<i>Figure I-1 : Schéma synthétique des processus et des forçages sur l'évolution des zones côtières (d'après Le Hir, 2008)</i>	16
<i>Figure I-2 : Effet fondamental de l'ajout de particules solides dans un fluide en première approximation : diminution de l'épaisseur moyenne cisailé (d'après Coussot et Ancey, 1999b).....</i>	20
<i>Figure I-3 : Comparaison de la viscosité d'une suspension de particules non colloïdales d'après deux formules typiques en fonction de la concentration d'entassement maximale : (1) Formule de Chong et al. (1971) ; (2) Formule de Quesmada (1985) (d'après Coussot et Ancey, 1999b)</i>	20
<i>Figure I-4 : Représentation conceptuelle des principaux comportements en cisaillement simple permanent. Courbe d'écoulement dans un diagramme logarithmique (a) et dans un diagramme linéaire (b) (d'après Coussot et Ancey, 1999b).....</i>	21
<i>Figure I-5 : Modèle de houle linéaire simple (Stokes) pour une profondeur infinie</i>	24
<i>Figure I-6 : Structure turbulente de l'écoulement et processus sédimentaires en milieu côtier (d'après Verney, 2006)</i>	26
<i>Figure I-7 : Influence de l'interaction entre les vagues et le courant sur le profil de vitesses. (d'après Van Rijn, 1990)</i>	27
<i>Figure I-8 : Diagramme des interactions non-linéaires des tensions de cisaillement sur le fond induites par les vagues et les courants. (d'après Soulsby et al., 1993)</i>	27
<i>Figure I-9 : Structure de l'écoulement, processus sédimentaires et caractéristiques rhéologiques des différents états des sédiments dans la colonne d'eau et à l'interface ..</i>	31

Partie II

<i>Figure II-1 : Carte bathymétrique de la baie de Marennes-Oléron (Charente-Maritime)</i>	38
<i>Figure II-2 : Carte des différents domaines de la baie de Marennes-Oléron.....</i>	40
<i>Figure II-3 : Répartition des différents faciès bio-sédimentaires en baie de Marennes-Oléron, d'après Hily (1977). Les prélèvements ont été réalisés à la benne et concernent une épaisseur d'environ 15 cm</i>	42
<i>Figure II-4 : Répartition des différents faciès sédimentaires en baie de Marennes-Oléron, d'après Weber (2004), pour le SHOM. Les prélèvements ont été réalisés à la benne et concernent une épaisseur d'environ 15 cm</i>	43
<i>Figure II-5 : Evolution du prisme tidal de la baie de Marennes-Oléron, au cours des 200 dernières années. (Bertin et al., 2005)</i>	44
<i>Figure II-6 : Direction et intensité des flux résiduels au niveau du pertuis d'Antioche et dans le bassin de Marennes-Oléron, en l'absence de vent. (d'après Stanisière et al., 2006) .</i>	46
<i>Figure II-7 : Renouvellement spatialisé (en jours) en situation de vent nul. (d'après Stanisière et al., 2006).....</i>	47
<i>Figure II-8 : Distribution trimestrielle des vents, entre 1990 et 2002, au phare de Chassiron (source Météo-France).....</i>	48
<i>Figure II-9 : Evolution de la biomasse des huîtres (Crassostrea gigas) en élevage dans le bassin de Marennes-Oléron depuis 1970.....</i>	49
<i>Figure II-10 : Répartition spatiale des densités moyennes d'huîtres sauvages et abandonnées dans le bassin ostréicole de Marennes-Oléron (d'après J.Prou, 1993)</i>	50

<i>Figure II-11 : Action cumulée de l'effet des tables et des huîtres provoquant dépôt de vase très fluide sur le banc de Lamouroux (Marennes-Oléron, France) en octobre 2008. (Photos : S.Kervella)</i>	<i>51</i>
--	-----------

Partie III

<i>Figure III-1 : Objectifs de l'étude selon différentes échelles spatio-temporelles</i>	<i>56</i>
<i>Figure III-2 : Carte des prélèvements sédimentaires superficiels au cours de l'année 2005, 2006, 2007 et de l'année 2008 en baie de Marennes-Oléron</i>	<i>58</i>
<i>Figure III-3 : a) Prélèvements des deux premiers centimètres de sédiments superficiels, sur le banc de Lamouroux, en août 2008 ; b) prélèvements par carottage, au droit du transducteur d'un altus, sur le bas de la vasière de Monportail-Brouage, à la fin de l'étude en avril 2008. (Photos : S.Kervella).....</i>	<i>59</i>
<i>Figure III-4 : Schématisation de l'évolution des contraintes obtenue lors de l'application de paliers de vitesse de 25 min. a : paliers de vitesse de cisaillement appliqués, b : réponse en contrainte, c : déstructuration et restructuration à cisaillement constant, d : rhéogramme établi. Exemple d'une suspension à 80 PPS et 100 g/l de smectite (d'après Paumier, 2007).....</i>	<i>64</i>
<i>Figure III-5 : Différentes définitions possibles de la contrainte critique d'écoulement. Par extrapolation de la courbe ascendante et descendante (valeur supérieure ou de Bingham : τ_1 et τ_2; valeur inférieure τ_3 et τ_4). Par définition de la valeur de pic de la contrainte : en test dynamique (τ_5 - Kuijper et al., 1992), et en test statique, à faible vitesse de déformation (τ_6- Migniot, 1968 ; Migniot et Hamm, 1990) (d'après Silva Jacinto, 2002)</i>	<i>66</i>
<i>Figure III-6 : Définition de la contrainte critique d'écoulement τ_y, dans cette étude pour une vitesse de cisaillement de $0,1 \text{ s}^{-1}$</i>	<i>67</i>
<i>Figure III-7 : Site d'étude type comportant l'ensemble des appareils de mesures autonomes déployés entre avril 2007 et avril 2008 (Site n°3, les Doux bas). (Photographie: S.Kervella).....</i>	<i>67</i>
<i>Figure III-8 : Carte de positionnement des appareils de mesures (altimètres ALTUS, courantomètres ADV, sondes multiparamètres YSI) en fonction des sites d'étude (n°1 à 7) de la baie de Marennes-Oléron et position des points RAZLEC qui ont permis d'obtenir des informations sur la température, la salinité et la turbidité de l'eau</i>	<i>69</i>
<i>Figure III-9 : Schéma descriptif du système autonome altimétrique ALTUS (source Ifremer)</i>	<i>71</i>
<i>Figure III-10 : Erreur topographique induite par les variations de la vitesse du son dans l'eau, suivant les variations de la salinité et de la température du milieu. Comparaison des données théoriques (équation de Coppens) et des résultats expérimentaux. (d'après Deloffre, 2005)</i>	<i>71</i>
<i>Figure III-11 : Données de température et de salinité enregistrées sur le banc d'Agnas, entre le 1^{er} mars 2007 et le 1^{er} avril 2008</i>	<i>72</i>
<i>Figure III-12 : Courantomètre ADV géopositionné par DGPS, sur sa structure en aluminium, sur le banc de Lamouroux, en novembre 2007. (Photographie : S.Kervella).....</i>	<i>73</i>
<i>Figure III-13 : Relation SNR/MES pour différents types de vases naturelles d'après Verney (2006). Ces relations sont complétées par celles concernant la vasière de Marennes-Oléron (en rouge).....</i>	<i>79</i>
<i>Figure III-14 : Hodographe de la direction des vents entre le 1er avril 2007 et le 5 avril 2008, au niveau du phare de Chassiron, à la pointe de l'île d'Oléron.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure III-15 : Domaine de calcul, maillage et bathymétrie du modèle hydrosédimentaire SiAM-2DH des pertuis charentais.....</i>	<i>82</i>

<i>Figure III-16 : Répartition initiale des faciès sédimentaires introduits dans la zone d'étude et "vue" par le modèle hydrosédimentaire SiAM, sur la base de la carte sédimentaire de Weber (2004).....</i>	84
<i>Figure III-17 : Forçages hydrodynamiques réels (01/03/07-04/03/08).....</i>	85
<i>Figure III-18 : Implantation des différents types d'élevages conchylicoles, vue par le modèle hydrosédimentaire SiAM-2DH de la baie de Marennes-Oléron. A gauche, ensemble du secteur modélisé; à droite, zoom sur le bassin de Marennes-Oléron</i>	88
<i>Figure III-19 : Principe général du modèle hydro-sédimentaire SiAM-2DH, appliqué à la baie de Marennes-Oléron.....</i>	89

Partie IV

<i>Figure IV-1 : Histogramme des fréquences relatives des différents sédiments mixtes (sables/vases) prélevés (basé sur la médiane granulométrique, norme USDA).....</i>	95
<i>Figure IV-2 : Fréquences relatives de taille de particules pour différents sites de la baie de Marennes-Oléron</i>	95
<i>Figure IV-3 : Diagramme triangulaire sable-silt-argile (Flemming, 2000) des sédiments mixtes (sables/vases) de la baie de Marennes-Oléron</i>	96
<i>Figure IV-4 : Diagramme triangulaire sable/silt/argile avec la transition entre les sédiments cohésifs/non cohésifs et les différents réseaux possible. (1 = non cohésif dominé par les sables, 2 = cohésif dominé par les sables, 3 = non cohésif mixte, 4 = cohésif dominé par les argiles, 5 = non cohésif dominé par les silts et 6 = cohésif dominé par les silts).....</i>	97
<i>Figure IV-5 : Histogramme des fréquences relatives des teneurs en eau des sédiments mixtes (sables/vases) prélevés à l'interface</i>	98
<i>Figure IV-6 : Exemple de rhéogramme type des sédiments superficiels de la baie de Marennes-Oléron (cas d'un sédiment d'une concentration de 777 g/l, contenant 6 % d'argile, 37 % de silt et 57 % de sable)</i>	99
<i>Figure IV-7 : Rhéogrammes caractéristiques des vases de Monportail (représentation des échelles linéaire et logarithmique) à différentes teneurs en eau (Kervella et al., 2009a)</i>	100
<i>Figure IV-8 : Exemple d'application du modèle de Herschel-Bulkley sur des rhéogrammes, en phase descendante, de différents sédiments mixtes (sables/vases) de la baie.....</i>	101
<i>Figure IV-9 : Relation entre le seuil d'écoulement, la teneur en sable et la teneur en eau des sédiments mixtes (sables/vases)</i>	102
<i>Figure IV-10 : Relation entre la teneur en sable et la teneur en eau des sédiments mixtes (sables/vases)</i>	102
<i>Figure IV-11 : Relation entre le seuil d'écoulement et la teneur en eau, en fonction des types de sédiments mixtes (sables/vases) définis à l'aide de la rhéométrie</i>	103
<i>Figure IV-12 : Relation entre le seuil d'écoulement et la fraction volumique des différents types de sédiments définis à partir des analyses rhéologiques et granulométriques.....</i>	104
<i>Figure IV-13 : Diagramme sédimentaire de phase des sédiments de la baie de Marennes-Oléron.....</i>	106
<i>Figure IV-14 : Relation entre la fraction volumique des vases (argile+silt) et le seuil d'écoulement mesuré sur les sédiments superficiels des zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron</i>	106
<i>Figure IV-15 : Seuil de contrainte des mélanges eau-vase-sable en fonction de la concentration volumique de grains divisée par la concentration d'entassement maximale</i>	108

Figure IV-16 : Classification (d'après Coussot et Ancey, 1999a) des divers types de mélanges que l'on peut rencontrer dans les sédiments superficiels de la baie de Marennes-Oléron, à partir de différents volumes de fins et de grains dans de l'eau.....	109
Figure IV-17 : Répartition des faciès sédimentaires superficiels de la baie de Marennes-Oléron, a) pour le premier centimètre et b) pour le second centimètre, en période estivale.....	111
Figure IV-18 : Répartition des faciès sédimentaires superficiels de la baie de Marennes-Oléron, a) pour le premier centimètre et b) pour le second centimètre, en période hivernale.....	112

Partie V

Figure V-1 : Position des sites de mesures hydrosédimentaires sur le littoral Est de l'île d'Oléron.....	119
Figure V-2 : Caractéristiques des vagues (H_s , T_r et τ_w) (a) pour la période du 06/04/07 au 28/03/08 sur le site de Boyardville (site n°1), (b) entre le 04/04/07 et le 08/04/08 sur les Doux haut (site n°2) et (c) entre le 04/04/07 et le 01/02/08 sur les Doux bas (site n°3)	121
Figure V-3 : Enregistrement en continu des paramètres physiques des vagues (H_s , T_r et τ_w) (a) à Boyardville (site n°1), (b) sur le bas (site n°2) et (c) sur le haut des Doux (site n°3), entre le 04/04/07 et le 08/04/08.....	122
Figure V-4 : Caractéristiques bimensuelles des vagues (H_s , T_r et τ_w) entre avril 2007 et mars 2008 sur le site n°1, 2 et 3 entre avril 2007 et mars 2008.....	124
Figure V-5 : Corrélation entre la hauteur significative des vagues (H_s) et avec la hauteur d'eau (h) mesurée sur le site n°1 (Boyardville), sur le site n°2 (Doux haut) et sur le site n°3 (Doux bas), entre le mois d'avril 2007 et le mois d'avril 2008. En pointillé, relation linéaire du type $H_s = \beta h$	125
Figure V-6 : Variations des paramètres hydrodynamiques (hauteur d'eau, vitesse du courant et contrainte du courant sur le fond) et sédimentaires (turbidité et hauteur du sédiment) pendant une marée mortes-eaux (ME) sur le site n°3 (Doux bas).....	128
Figure V-7 : Variations des paramètres hydrodynamiques (hauteur d'eau, vitesse du courant et contrainte du courant sur le fond) et sédimentaires (turbidité et hauteur du sédiment) pendant une marée de vives-eaux (VE) sur le site n°3 (Doux bas).....	129
Figure V-8 : Variations des hauteurs du sédiment (a) au cours de la marée, pendant une mortes-eaux (ME) et (b) une vives-eaux (VE), sur le site n°2 (Doux haut).....	130
Figure V-9 : Séquences érosives, liées à l'activité des vagues, sur le site n°3 (Doux bas), entre le 29/11/07 et le 13/12/07.....	132
Figure V-10 : Séquences érosives liées à l'activité des vagues sur le site n°2 (Doux haut), entre le 29/11/07 et le 13/12/07.....	134
Figure V-11 : Variations des paramètres texturaux et comportementaux des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) sur les sites de Boyardville (n°1), et des Doux (n°2 et n°3), entre avril 2007 et avril 2008.....	136
Figure V-12 : Variations de la hauteur des sédiments, entre le 04/04/07 et le 08/04/08 sur le haut et sur le bas de l'estran (site n°2 et n°3) de la partie Ouest de la baie, en fonction de la hauteur d'eau mesurée et de la vitesse moyenne du vent enregistrée au phare de Chassiron.....	138
Figure V-13 : Résultats en radiographie au rayon X (SCOPIX) : niveaux de gris et taille moyenne des particules sur le site des Doux haut (n°2). Date : 08/04/08.....	139
Figure V-14 : Evolution de la densité des herbiers sur la zone des Doux haut (site n°2). (Photos : S.Kervella).....	140

Figure V-15 : Position des sites de mesures hydrosédimentaires sur la vasière de Monportail-Brouage	141
Figure V-16 : Caractéristiques des vagues (H_s , T_r et τ_w) (a) pour la période du 14/06/07 au 01/02/08 sur le site n°5 et (b) entre le 05/04/07 et le 09/04/08 sur le site n°6	142
Figure V-17 : Enregistrement en continu des paramètres physiques des vagues (H_s , T_r et τ_w) (a) sur le bas et (b) sur le haut de la vasière	143
Figure V-18 : Caractéristiques bimensuelles des vagues (H_s , T_r et τ_w) entre avril 2007 et mars 2008 sur le bas (site n°5) et le haut de la vasière (site n°6)	144
Figure V-19 : Détermination de la droite enveloppe (en pointillé) caractérisant la relation linéaire du type $H_s = \beta h$ obtenue à partir des données provenant du site n°5 (Brouage bas) et du site n°6 (Brouage haut), entre le mois d'avril 2007 et le mois d'avril 2008.	145
Figure V-20 : Variations des paramètres hydrodynamiques (hauteur d'eau, vitesse du courant et contrainte du courant sur le fond) et sédimentaires (turbidité et hauteur du sédiment) pendant une période de mortes-eaux (ME) sur le bas de la vasière de Monportail-Brouage (site n°5) : (a) hauteur d'eau, (b) hauteur du sédiment, (c) turbidité, (d) vitesse du courant et (e) contrainte de frottement du courant	147
Figure V-21 : Variations des paramètres hydrodynamiques (hauteur d'eau, vitesse du courant et contrainte du courant sur le fond) et sédimentaires (turbidité et hauteur du sédiment) pendant une période de vives-eaux (VE), sur le bas de la vasière de Monportail-Brouage (site n°5) : (a) hauteur d'eau, (b) hauteur du sédiment, (c) turbidité, (d) vitesse du courant et (e) contrainte de frottement du courant	148
Figure V-22 : Variations de la hauteur du sédiment pendant une période de vives-eaux (VE) sur le haut de sur le haut de la vasière de Monportail-Brouage (site n°6)	149
Figure V-23 : Séquences érosives sur la partie basse de la vasière de Monportail-Brouage (site n°5), liées à l'activité des vagues entre le 29/11/07 et le 14/12/07	151
Figure V-24 : Séquences érosives, liées à l'activité des vagues, sur la partie haute de la vasière, entre le 01/03/08 et le 01/04/08	153
Figure V-25 : Variations des paramètres texturaux et rhéologiques des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) sur le bas et le haut de la vasière de Brouage, entre avril 2007 et avril 2008	155
Figure V-26 : Variations altimétriques enregistrées sur le bas et le haut de la vasière, en fonction des débits de la Charente (à St-Savinien), de la turbidité enregistrée au niveau du banc d'Agnas et en fonction des hauteurs de vagues (H_s) sur chacun des sites. Période de mesures : 05/04/07-09/04/08	156
Figure V-27 : Aspects des sédiments de surface (a) sur le bas de la vasière, le 19/07/07 et (b) sur le haut de la vasière, le 26/07/07. (Photos S.Kervella).....	157
Figure V-28 : Aspects des sédiments de surface (a) sur le bas (site n°5), le 27/11/07 et (b) sur le haut de la vasière de Monportail-Brouage, le 28/11/07. (Photos S.Kervella).....	157
Figure V-29 : Aspects des sédiments de surface (a) sur le site n°5, le 20/02/08 et (b) sur le site n°6 de la vasière de Monportail-Brouage, le 23/01/08. (Photos S.Kervella)	158
Figure V-30 : Evolution de la hauteur de l'interface sédimentaire sur le bas (b) et le haut (c) de la vasière de Monportail-Brouage en fonction de la hauteur d'eau et du débit de la Charente, entre le 10/01/08 et le 29/02/08.....	159
Figure V-31 : Comparaison des enregistrements altimétriques et de l'épaisseur des dépôts frais identifiés à l'aide des rayons X sur le site n°5, le 01/04/08.....	160
Figure V-32 : Radiographie au rayon X, niveaux de gris, taille moyenne des particules et profil de l'activité du Pb210 en excès sur le bas de la vasière (site n°5) et détermination du taux de sédimentation. Date : 01/04/08	161
Figure V-33 : Comparaison des enregistrements altimétriques et de l'épaisseur des dépôts frais identifiés à l'aide des rayons X, sur le bas de la vasière, le 01/04/08.....	162

<i>Figure V-34 : Radiographie au rayon X, niveaux de gris, taille moyenne des particules et profil de l'activité du Pb210 en excès, sur le haut de la vasière de Monportail-Brouage (site n°6) et détermination du taux de sédimentation. Date : 01/04/08</i>	163
---	-----

Partie VI

<i>Figure VI-1 : Position du site de mesures hydro-sédimentaire sur le banc de Lamouroux ..</i>	170
<i>Figure VI-2 : Variations des paramètres sédimentaires (% de fractions sableuse, silteuse et argileuse) et rhéologiques (seuil d'écoulement) des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) à l'extrémité d'une table et sous une table ostréicole sur le banc de Lamouroux, entre avril 2007 et avril 2008</i>	172
<i>Figure VI-3 : Variations de la hauteur des sédiments, (b) à l'extrémité d'une table ostréicole, (c) sous une table ostréicole et (a) en fonction de la hauteur des vagues, entre le 15/06/07 et le 21/03/08.....</i>	174
<i>Figure VI-4 : Evolutions mensuelles de la masse moyenne des sestons dans la colonne d'eau et du poids sec moyen des huîtres dans la baie de Marennes-Oléron, en 2007.....</i>	175
<i>Figure VI-5 : Estimation de l'évolution mensuelle de la consommation, de l'ingestion et des rejets des fèces et pseudofèces par les huîtres sur le site du banc de Lamouroux, en 2007</i>	176
<i>Figure VI-6 : Estimation de l'évolution mensuelle des flux de dépôts et de l'épaisseur de sédiment déposé par les huîtres, sous deux poches, sur le banc de Lamouroux, en 2007</i>	176
<i>Figure VI-7 : Comparaison entre l'épaisseur des dépôts simulés, provoqués par les huîtres, et les épaisseurs mesurées par l'altimètre « sous table », entre le mois de juin et le mois de décembre 2007</i>	177
<i>Figure VI-8 : Comparaison de l'aspect des sédiments de surface entre le 26/11/07 et le 12/12/07 sur le banc de Lamouroux. (a) Le 26/11/07, le sédiment est une vase très fluide, d'épaisseur pluri-centimétrique ; (b) Le 12/12/07, le sédiment de surface est sablo-vaseux à sableux. Des figures d'érosion de plusieurs mètres carrés sont visibles, ainsi que des rides de clapots. (Photos : S.Kervella).....</i>	178
<i>Figure VI-9 : Vitesses et directions moyenne horaire du vent, entre le 28/11/07 et 13/12/07, mesurées par Météo France au phare de Chassiron (Île d'Oléron).....</i>	178
<i>Figure VI-10 : Caractéristiques (a) des hauteurs significatives et (b) du spectre de fréquence-direction des vagues au niveau de l'île d'Oléron, le 02/12/07 à 19h (Données Prévimer)</i>	179
<i>Figure VI-11 : Caractéristiques (a) des hauteurs significatives et (b) du spectre de fréquence-direction des vagues au niveau de l'île d'Oléron, le 09/12/07 à 19h (Données Prévimer)</i>	179
<i>Figure VI-12 : Variations des paramètres hydrodynamiques (marnage, vitesse du courant, hauteurs des vagues, périodes et contraintes de frottement sur le fond des vagues) et sédimentaires (turbidité et hauteur du sédiment), entre le 30/11/07 et le 11/12/07</i>	181
<i>Figure VI-13 : Variations, sur une période de 150 secondes, des trois niveaux d'énergie acoustique de l'altimètre, permettant de déterminer la hauteur du sédiment, en fonction de la hauteur et de la fréquence des vagues sur le banc de Lamouroux, pour trois périodes distinctes : une période calme (en rouge), et deux périodes agitées (en jaune et noir)</i>	183
<i>Figure VI-14 : Radiographie au rayon X, niveaux de gris, taille moyenne des particules et profil de l'activité du Pb210 en excès, sur le bas de la vasière</i>	185
<i>Figure VI-15 : Bathymétrie du banc de Lamouroux en 2005, 2007 et 2008</i>	186

<i>Figure VI-16 : Variations altimétriques et histogrammes de distribution des écarts bathymétriques du banc de Lamouroux, entre (a) mai 2005 et mai 2007 et (b) entre mai 2007 et février 2008</i>	187
<i>Figure VI-17 : Hauteurs significatives moyennes trihoraires (en bleu) et mensuelles (en rouge) des vagues, au large de l'île d'Oléron, données par le modèle WaveWatch III (NOAA), entre janvier 2005 et avril 2008, modifiées d'après Breilh (2008). Les dates de réalisation des relevés bathymétriques du banc sont signalées par des droites verticales en pointillés</i>	189

Partie VII

<i>Figure VII-1 : Structuration cardinale de la zone de comparaison</i>	198
<i>Figure VII-2 : Contraintes maximales de cisaillement des vagues sur le fond simulées, en plusieurs mailles autour du site n°3, pour la période couvrant les deux tempêtes de décembre 2007 (entre le 02 et le 09 décembre). Vent de secteur Sud-Ouest à Ouest, soufflant à 19-20 m/s</i>	198
<i>Figure VII-3 : Distribution des contraintes de cisaillement maximales sur le fond induites par les vagues, pour la période couvrant les deux tempêtes de décembre 2007 (entre le 02 et le 09 décembre). Vent de secteur Sud-Ouest à Ouest, soufflant à 19-20 m/s</i>	199
<i>Figure VII-4 : Comparaison entre la contrainte de frottement des vagues sur le fond simulées (en rouge) et celle mesurées (en bleu) à partir des ALTUS, entre le 01/04/07 et le 01/04/08</i>	201
<i>Figure VII-5 : Vitesse moyenne tri-horaire (en rouge) et direction du vent (en bleu), au niveau du phare de Chassiron, entre le 11/05/07 et le 17/05/07</i>	202
<i>Figure VII-6 : Comparaison entre la contrainte de frottement des vagues sur le fond simulée (en rouge) et celle calculée (en bleu) à partir des ALTUS (période du 11/05/07 au 17/05/07), pour le site n°1, 2, 3, 5, 6 et pour le site n°7</i>	204
<i>Figure VII-7 : Vitesse moyenne (tri-horaire) et direction du vent, enregistrées au phare de Chassiron, entre le 30/11/07 et le 13/12/07</i>	205
<i>Figure VII-8 : Comparaison entre la contrainte de frottement des vagues sur le fond simulée (en rouge) et celle calculée (en bleu) à partir des ALTUS (période du 30/11/07 au 13/12/07), pour le site n°1 à 7</i>	206
<i>Figure VII-9 : Relations entre la contrainte critique d'érosion (τ_{ce}) d'une part, le seuil d'écoulement (τ_y) d'autre part et la concentration relative de vase (C.) dans le sédiment superficiel</i>	209
<i>Figure VII-10 : Turbidités simulées à 15 cm du fond, en plusieurs mailles autour du site n°3</i>	210
<i>Figure VII-11 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée au niveau du banc d'Agnas, a) entre le 27/11/07 et le 13/12/07, soit 272 jours après le début de la simulation et b) entre le 03/03/08 et le 15/03/08, soit 374 jours après le début de la simulation</i>	212
<i>Figure VII-12 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée dans le secteur des Doux bas (site n°3), entre le 9/04/07 et le 24/04/07</i>	214
<i>Figure VII-13 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée sur le bas de la vasière de Brouage (site n°5), entre le 9/04/07 et le 24/04/07</i>	215
<i>Figure VII-14 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée sur le banc d'Agnas, entre le 9/04/07 et le 24/04/07</i>	215
<i>Figure VII-15 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée dans le secteur des Doux bas (site n°3), entre le 10/02/08 et le 20/02/08</i>	217

<i>Figure VII-16 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée sur le bas de la vasière de Brouage (site n°5), entre le 10/02/08 et le 20/02/08</i>	<i>217</i>
<i>Figure VII-17 : Comparaison entre la concentration de MES mesurée et celle calculée sur le banc d'Agnas, entre le 10/02/08 et le 20/02/08</i>	<i>218</i>
<i>Figure VII-18 : Comparaison des fractions résiduelles de vase simulées avec les cartes sédimentaire établies dans la partie IV-4. La variable représentée pour les sorties du modèle est la valeur minimale de la fraction massique de vase dans les deux premiers millimètres du sédiment, pendant un cycle de marée complet (ME+VE), soit 10 jours. a) La situation estivale est prise entre le 11 et le 21 août 2007. b) La situation hivernale est prise entre le 11 et le 21 mars 2008</i>	<i>222</i>
<i>Figure VII-19 : Evolutions a) de la bathymétrie et b) des stocks sédimentaire de la baie, entre le 40e jour (09/04/07) et le 400e jour de simulation (04/04/08).....</i>	<i>223</i>
<i>Figure VII-20 : Comparaison de l'altitude de l'interface sédimentaire simulée et mesurée, entre le 16/06/07 et le 01/04/08, sur le bas de la vasière de Brouage (site n°5). (NB : au début du mois d'octobre 2007, un problème d'affouillement au niveau de la station de mesure a provoqué l'érosion visible sur les mesures, cf. part. V-3.4.2.)</i>	<i>224</i>
<i>Figure VII-21 : Cartes des variations altimétriques simulées par le modèle, entre le 40e et le 400e jour de simulation, a) en présence et b) en l'absence d'huîtres.....</i>	<i>226</i>
<i>Figure VII-22 : Cartes des variations du stock sédimentaire simulées par le modèle, entre le 40e et le 400e jour de simulation, a) en présence et b) en l'absence d'huîtres</i>	<i>226</i>
<i>Figure VII-23 : Couvertures sédimentaires simulées, en été et en hiver, avec et sans installations ostréicoles. La variable représentée est la valeur minimale de la fraction massique de vase dans les deux premiers millimètres du sédiment, pendant un cycle de marée complet (ME +VE). La situation estivale est prise entre le 12 et le 22 août 2007. La situation hivernale est prise entre le 12 et le 22 mars 2008</i>	<i>228</i>
<i>Figure VII-24 : Variations altimétriques mesurées par les ALTUS sous (Lamouroux « st ») et à l'extrémité d'une table ostréicole (Lamouroux « bt ») sur le banc de Lamouroux</i>	<i>229</i>
<i>Figure VII-25 : Position des mailles (99,80), (98,77) et (98,79) matérialisées par les carrés rouges, (98,77) étant la maille la plus au Sud et (99,80) la plus au Nord</i>	<i>230</i>
<i>Figure VII-26 : Détails des variations de la fraction de vase en surface, de la hauteur du sédiment, des tensions de cisaillements des vagues et du niveau de marée, sur le banc de Lamouroux. (période simulée : du 01/03/07 au 04/04/08).....</i>	<i>231</i>
<i>Figure VII-27 : Variabilité à l'échelle locale des érosions observées après de fortes tempêtes (décembre 2007) sur le banc de Lamouroux.....</i>	<i>232</i>
<i>Figure VII-28 : Evolution temporelle de la hauteur du sédiment et de la fraction vaseuse de deux « carottes numériques » en présence de structures ostréicoles. a) pour la maille (98,79) et b) pour la maille (98,77). (période simulée, du 01/03/07 au 04/04/08)</i>	<i>233</i>
<i>Figure VII-29 : Evolution temporelle de la hauteur du sédiment et de la fraction vaseuse de deux « carottes numériques » en l'absence de structures ostréicoles. a) pour la maille (98,79) et b) pour la maille (98,77). (période simulée, du 01/03/07 au 04/04/08)</i>	<i>233</i>

Partie VIII

<i>Figure VIII-1 : Schématisation du fonctionnement hydro-sédimentaire des estrans Est et Ouest en été</i>	<i>243</i>
<i>Figure VIII-2 : Schématisation du fonctionnement hydro-sédimentaire des estrans Est et Ouest en hiver.....</i>	<i>243</i>

<i>Figure VIII-3 : Schématisation (a) du cycle sédimentaire sur le banc de Lamouroux et (b) de l'action des couches sédimentaires supérieures sur le drainage des eaux interstitielles des sédiments vaseux</i>	<i>244</i>
---	------------

Annexes

<i>Figure A-1 : Profil schématique des vitesses lorsqu'un glissement à la paroi se produit avec une discontinuité au niveau de la paroi</i>	<i>256</i>
<i>Figure A-2 : Représentation schématique du profil des vitesses lorsqu'une fracturation se produit (à gauche) par rapport au profil théorique (à droite).....</i>	<i>257</i>
<i>Figure A-3 : Le creusement à la périphérie. Le rayon effectif est inférieur (R-e) au rayon théorique (R)</i>	<i>257</i>
<i>Figure A-4 : Répartition annuelle des directions des vents entre le mois d'avril 2007 et le mois de mars 2008.....</i>	<i>259</i>
<i>Figure A-5 : Répartition mensuelle des directions et des intensités des vents entre le mois d'avril 2007 et le mois de juillet 2007.....</i>	<i>260</i>
<i>Figure A-6 : Répartition mensuelle des directions et des intensités des vents entre le mois d'août 2007 et le mois de novembre 2007.....</i>	<i>261</i>
<i>Figure A-7 : Répartition mensuelle des directions et des intensités des vents entre le mois de décembre 2007 et le mois de mars 2008</i>	<i>262</i>
<i>Figure A-8 : Enregistrements des caractéristiques des vagues et des mouvements de l'interface sédimentaire sur le banc de Perquis (site n°7), entre le 15/04/07 et le 10/04/08 (à partir d'un ALTUS).....</i>	<i>263</i>
<i>Figure A-9 : Enregistrements des caractéristiques des courants de marée, des vagues et de la turbidité, sur le banc de Lamouroux, entre le 25/10/07 et le 25/11/07(à partir d'un ADV)</i>	<i>264</i>

TABLEAUX

Partie III

<i>Tableau III-1 : Détails des campagnes de prélèvements sédimentaires entre 2005 et 2008 ...</i>	60
<i>Tableau III-2 : Présentation des caractéristiques des protocoles lent et rapide définis pour étudier le seuil d'écoulement sur des sédiments naturels</i>	65
<i>Tableau III-3 : Description des sites d'étude hydro-sédimentaire</i>	68
<i>Tableau III-4 : Périodes de mesures pour chaque site, en fonction des appareils hydro-sédimentaires utilisés</i>	70
<i>Tableau III-5 : Paramétrages des altimètres (ALTUS) et des courantomètres (ADV), types de mesure et cycles étudiés</i>	73
<i>Tableau III-6 : Exemples de valeurs moyennes de la longueur de rugosité pour différents types de sédiments (Soulsby, 1997)</i>	75
<i>Tableau III-7 : Récapitulatif des paramètres enregistrés (T, S, turbidité) et périodes de mesures (Avril 2007 à Avril 2008)</i>	78
<i>Tableau III-8 : Correspondance entre les faciès sédimentaires définis par Weber (2004) et les classes de sédiments considérées dans le modèle sédimentaire</i>	83

Partie IV

<i>Tableau IV-1 : Données statistiques des sédiments mixtes (sables/vases) prélevés au niveau de l'interface sédimentaire, entre 2005 et 2008</i>	94
<i>Tableau IV-2 : Les différents réseaux et leurs cohésions associés (d'après Van Ledden et al., 2004).....</i>	98
<i>Tableau IV-3 : Valeur moyenne, médiane, minimale et maximale des teneurs en eau de l'ensemble des sédiments prélevés à l'interface, entre 2005 et 2008</i>	98
<i>Tableau IV-4 : Valeurs équivalentes entre les différents paramètres physiques</i>	99
<i>Tableau IV-5 : Exemples de caractéristiques sédimentaires de différents échantillons et valeurs des paramètres de l'équation d'Herschel-Bulkley, pour des vitesses de cisaillements inférieures à 10 s^{-1}</i>	101
<i>Tableau IV-6 : Description des limites des différentes fractions sédimentaires en fonction des types sédimentaires définis à l'aide de la rhéométrie</i>	103
<i>Tableau IV-7 : Relation entre le seuil d'écoulement et la fraction volumique solide pour les cinq types de sédiments</i>	105

Partie V

<i>Tableau V-1 : Tableau récapitulatif des caractéristiques bimensuelles des vagues sur les années 2007 et 2008 pour le site de Boyardville (site n°1), le site des Doux haut (site n°2) et pour le site des Doux bas (site n°3) (* Les données relatives aux vagues fournies par cet ALTUS ont été considérées comme non valides à partir du 01/02/08. Elles n'ont donc pas été prises en compte dans ces calculs).....</i>	120
<i>Tableau V-2 : Rapport Hs/h, valeur de la pente (β), paramètre de frottement (f_w), hauteur d'eau maximale (h_{max}) et hauteur significative maximale des vagues (H_{max}) calculée sur le site n°1, n°2 et n°3</i>	126

<i>Tableau V-3 : Caractéristiques des courants de marée maximum et de la turbidité associés sur le bas de l'estran en période de mortes-eaux (ME) et en vives-eaux (VE), en période calme</i>	126
<i>Tableau V-4 : Récapitulatif des paramètres texturaux (% de fractions sableuse, silteuse et argileuse) et comportementaux (seuil d'écoulement, teneur en eau pondérale et concentration massique) des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) sur les sites de Boyardville (n°1) et des Doux (n°2 et n°3), entre avril 2007 et avril 2008</i>	136
<i>Tableau V-5 : Rapport Hs/h, valeur de la pente (β), paramètre de frottement (f_w), hauteur d'eau maximale (h_{max}) et hauteur significative maximale des vagues (H_{max}) calculées sur les sites n°5 et n°6</i>	145
<i>Tableau V-6 : Caractéristiques des courants de marée maximum et de la turbidité sur le bas de la vasière de Monportail-brouage (site n°5), en période de mortes-eaux (ME) et en vives-eaux (VE), en période calme</i>	146
<i>Tableau V-7 : Récapitulatif des paramètres texturaux (% de sable, silt et argile) et rhéologiques (seuil d'écoulement, teneur en eau pondérale et concentration massique) des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) sur le bas et le haut de la vasière de Brouage, entre avril 2007 et avril 2008</i>	154
<i>Tableau V-8 : Comparaison des caractéristiques des vagues, des courants et des sédiments que l'on peut rencontrer sur le littoral est de l'île d'Oléron et sur la vasière de Monportail-Brouage</i>	164

Partie VI

<i>Tableau VI-1 : Récapitulatif des paramètres sédimentologiques (% de sable, silt et argile) et rhéologiques (seuil d'écoulement, teneur en eau pondérale et concentration massique) des sédiments de surface (0 à 5 mm, 5 à 10 mm et 10 à 20 mm de profondeur) à l'extrémité d'une table et sous une table ostréicole, sur le banc de Lamouroux, entre avril 2007 et avril 2008</i>	172
<i>Tableau VI-2 : Caractéristiques granulométriques et rhéologiques des séquences de dépôts vaseux n°2 et n°4</i>	184
<i>Tableau VI-3 : Caractéristiques des courants de marée et turbidité associés sur le banc de Lamouroux (site n°4), en mortes-eaux (ME) et en vives-eaux (VE), en période calme</i> .	188
<i>Tableau VI-4 : Données caractéristiques des hauteurs significatives des vagues pour les hivers 2006, 2007 et 2008, d'après les données fournies par le modèle WaveWatch III (NOAA), au large de l'île d'Oléron</i>	189
<i>Tableau VI-5 : Evolution du banc de Lamouroux en fonction du régime de houle et de la puissance des vagues lors des premières tempêtes, de l'ostréiculture et des courants de marée</i>	190

Partie VII

<i>Tableau VII-1 : Fenêtres d'exposition aux vents et aux vagues (houles et clapots), des différents sites instrumentés</i>	197
<i>Tableau VII-2 : Récapitulatif des principaux paramètres hydro-sédimentaires modifiés, par rapport à l'étude réalisée par le Hir (2006), dans le modèle sédimentaire SiAM-2DH 208</i>	
<i>Tableau VII-3 : Grandeurs statistiques utilisées pour la comparaison des turbidités simulées et mesurées. On note x_i la valeur mesurée au pas de temps i et y_i la valeur simulée au</i>	

<i>même pas de temps. \bar{x} et \bar{y} sont respectivement les valeurs moyennes de x_i et de y_i pour les N pas de temps</i>	210
<i>Tableau VII-4 : Echelle d'appréciation des valeurs du SI obtenues pour la comparaison des turbidités mesures/modèle</i>	211
<i>Tableau VII-5 : Paramètres statistiques de la simulation de la turbidité près du fond, en période de vagues au niveau du banc d'Agnas, entre le 27/11/07 et le 13/12/07, et entre le 03/03/08 et le 15/03/08</i>	212
<i>Tableau VII-6 : Paramètres statistiques de la simulation de la turbidité près du fond au niveau du banc d'Agnas, des Doux bas et de Brouage bas, entre le 09/04/07 et le 24/04/07</i>	214
<i>Tableau VII-7 : Paramètres statistiques de la simulation de la turbidité près du fond, au niveau du banc d'Agnas, des Doux bas et de Brouage bas, entre le 10/02/08 et le 20/02/08</i>	216
<i>Tableau VII-8 : Correspondances entre les fractions de vases correspondant aux faciès sédimentaires utilisés dans les cartes saisonnières (cf part. IV-4.) avec les fractions de vases retenues dans le modèle SiAM-2DH</i>	220

REFERENCES

- Allersma, E.** 1988. Morfologisch onderzoek Noordelijk Deltabekken. Morfologische modellering deel IV: Composition and Density of Sediments (in Dutch) (Report Z71.03). Delft: WL/Delft Hydraulics.
- Amos, C., Li, M. et Sutherland, T.** 1998. The contribution of ballistic momentum flux to the erosion of cohesive beds by flowing water. *Journal of Coastal Research*, **14**: 564-569.
- Andersen, T.J.** 2001. Seasonal Variation in Erodibility of Two Temperate, Microtidal Mudflats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **53**: 1-12.
- Andersen, T.J. et Pejrup, M.** 2001. Suspended sediment transport on a temperate, microtidal mudflat, the Danish Wadden Sea. *Marine Geology*, **173**: 69-85.
- Barillé, L., Prou, J., Héral, M. et Razet, D.** 1997. Effects of high natural seston concentrations on the feeding selection, and absorption of the oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg). *Journal of experimental marine biology and ecology*, **212**: 149-172.
- Baruseau, J.P.** 1973. *Evolution du plateau continental rochelais (golfe de Gascogne) au cours du Pléistocène terminal et de l'Holocène*. Thèse, Bordeaux I, Bordeaux, 363 pp.
- Bassoullet, P. et Hir, P.L.** 2007. In situ measurements of surficial mud strength: A new vane tester suitable for soft intertidal muds. *Continental Shelf Research*, **27**: 1200-1205.
- Bassoullet, P., Le Hir, P., Gouleau, D. et Robert, S.** 2000. Sediment transport over an intertidal mudflat : field investigations and estimation of fluxes within the " Baie de Marennes-Oléron " (France). *Continental Shelf Research*, **20**: 1635-1654.
- Baudez, J.C.** 2001. *Rhéologie et physico-chimie des boues résiduaires pâteuses pour l'étude du stockage et de l'épandage*. Thèse de doctorat de l'ENGREF Paris, Paris, 236 pp.
- Behn, V.C.** 1962. Experimental determination of sludge flow parameters. *J. Sanit. Eng. Div.*, **SA3**: 39-54.
- Bellair, P. et Pomerol, C.** 1984. *Eléments de géologie*, Paris.
- Berlamont, J., Ockenden, M., Toorman, E. et Winterwerp, J.** 1993. The characterisation of cohesive sediment properties. *Coastal Engineering*, **21**: 105-128.
- Bernard, F.R.** 1974. Particle sorting and labial palp function in the Pacific oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1795). *Biol. Bull.*, **146**: 1-10.
- Berner, R.A.** 1980. *Early diagenesis : a theoretical approach*, Princeton, 241 pp.
- Bertin, X.** 2005. *Morphodynamique séculaire, architecture interne et modélisation d'un système baie/embouchure tidale : le Pertuis de Maumusson et la baie de Marennes-Oléron*. thèse, Université de la Rochelle, la Rochelle.
- Bertin, X. et Chaumillon, E.** 2005. Apports de la modélisation sur bathymétries historiques dans la compréhension des évolutions des bancs de sable estuariens. *C.R. Geoscience*, **337**: 1375-1383.
- Bertin, X., Chaumillon, E., Sottolichio, A. et Pedreros, R.** 2005. Tidal inlet response to sediment infilling of the associated bay and possible implications of human activities: the Marennes-Oleron Bay and the Maumusson Inlet, France. *Continental Shelf Research*, **25**: 1115-1131.
- Birben, A.R., Özölçer, I.H., Karasu, S. et Kömürcü, M.I.** 2007. Investigation of the effects of offshore breakwater parameters on sediment accumulation. *Ocean Engineering*, **34**: 284-302.
- Blard, P.H.** 2001. Etude morpho-dynamique du système de drainage de la vasière intertidale de Montportail- Brouage (France). Rapport, Ifremer.
- Borum, J., Duarte, C.M., Krause-Jensen, D. et Greve, T.M.** 2004. European seagrass: an introduction to monitoring and management. *The M&M's project*, **88**.
- Bos, A.R., Bouma, T.J., Kort, G.L.J.d. et Katwijk, M.M.v.** 2007. Ecosystem engineering by annual intertidal seagrass beds: Sediment accretion and modification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **74**: 344-348.

- Boutier, B., Chiffolleau, J.-F., Gonzalez, J.-L., Lazure, P., Auger, D. et Truquet, I.** 2000. Influence of the Gironde estuary outputs on cadmium concentrations in the coastal waters: consequences on the Marennes-Oléron bay (France). *Oceanologica acta*, **23**: 745-757.
- Breilh, J.F.** 2008. Etude du climat de houle sur les côtes exposées de Charente-Maritime entre 1998 et 2008 à partir de donnée du modèle numérique Wave Watch 3, Université de la Rochelle, le Rochelle.
- Castaing, P.** 1981. *Le transfert à l'océan des suspension estuariennes. (cas de la Gironde)*. Thèse, Bordeaux I, Bordeaux.
- Charonnat, Y.** 1993. Malaxage des matériaux. Homogénéisation, ségrégation, qualité de l'enrobage, thème CH 10, LCPC
- Chesher, T.J. et Ockenden, M.C.** 1997. Numerical modelling of mud and sand mixtures. In: *Cohesive sediments* (Ed R.P.a.J.W.e. N. Burt), pp. 395-406.
- Chou, H.-T., Foda, M.-A. et Hunt, J.-R.** 1993. *Rheological response of cohesive sediments to oscillatory forcing*. Coastal and Estuarine Studies, **42**. American Geophysical Union, Washington, DC, 22 pp.
- Christiansen, C., Vølund, G., Lund-Hansen, L.C. et Bartholdy, J.** 2006. Wind influence on tidal flat sediment dynamics: Field investigations in the Ho Bugt, Danish Wadden Sea. *Marine Geology*, **235**: 75-86.
- Combe, J.P., Méléder, V., Launeau, P., Barillé, L., Robert, S., Carrère, V. et Rincé, Y.** 2003 Assessing microphytobenthos structure with DAIS 7915 hyperspectral data in an intertidal coastal zone. In: *3rd Workshop of the EARSeL, Special Interest Group on Imaging Spectroscopy, 13-16/05/03*, Oberpfaffenhoffen, Germany.
- 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**: 862-863.
- Coussot, P.** 1997. *Mudflow rheology and dynamics*. A.A. Balkema, Rotterdam
- Coussot, P. et Ancey, C.** 1999a. Rhéophysical classification of concentrated suspensions and granular paste. *Physical Review*, **E59**: 4445-4457.
- Coussot, P. et Ancey, C.** 1999b. *Rhéophysique des pâtes et des suspensions*. EDP Sciences.
- Coussot, P. et Grossiord, J.L.** 2001. *Comprendre la rhéologie - De la circulation du sang à la prise du béton*. EDP Sciences, Paris.
- Coussot, P., et Piau, J.-M.** 1995. *A large-scale field coaxial cylinder rheometer to study the rheology of natural coarse suspensions*. *Journal of Rheology*, **39**, 105-124.
- Cromwell, J.E.** 1971. Barrier coast distribution : a worldwide survey. In: *In abstracts 2nd National Coastal and Shallow Water Research Conférence*, pp. 50.
- Cugier, P. et Le Hir, P.** 2000. Three dimensional modelling of suspended matters in the eastern "baie de Seine" (English Channel, France). *C.R.A.S. Oceanography*, **331**: 287-294.
- Cugier, P. et Le Hir, P.** 2002. Development of a 3D Hydrodynamic Model for Coastal Ecosystem Modelling. Application to the Plume of the Seine River (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **55**: 673-695.
- Dalloyau, S.** 2008. *Réponse fonctionnelle et stratégies d'hivernage chez un anséridé en lien avec la disponibilité de la ressource alimentaire - Cas de la Bernache cravant à ventre sombre (Branta bernicla bernicla) en hivernage sur le littoral atlantique (Île d'Oléron - Charente Maritime - 17)*. Thèse, Université de Montpellier, Montpellier, 157 pp.
- de Wit, P.J. et Kranenburg, C.** 1997. The Wave-induced Liquefaction of Cohesive Sediment Beds. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **45**: 261-271.
- Delo, E.A. et Ockenden, M.C.** 1989. Prediction of siltation at a point. In: *National Conference on Hydraulic Engineering* (Ed M.A. Ports), **1**, pp. 981-986.
- Deloffre, J.** 2005. *La sédimentation fine sur les vasières intertidales en estuaires macrotidaux*. thèse, Université de Rouen, Rouen, 236 pp.

- Deloffre, J., Verney, R., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S. et Cundy, A.B.** 2007. Sedimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries: Sedimentation rhythms and their preservation. *Marine Geology*, **241**: 19-32.
- Dyer, K.R., Christie, E.W. et Wright, E.W.** 2000. The classification of intertidal mudflats. *Continental Shelf Research*, **20**: 1039-1060.
- Dyer, K.R., Christie, M.C. et Manning, A.J.** 2004. The effect of suspended sediment on turbulence within an estuarine turbidity maximum. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **59**: 237-248.
- Eisma, D. et Li, A.** 1993. Changes in suspended matter floc size during the tidal cycle in the Dollard estuary. *Netherlands Journal of Sea Research*, **31**, p 107-117
- Feng, J.** 1993. Laboratory experiments on cohesive soil-bed fluidization by water waves. Ph.D. Dissertation, University of Florida, Gainesville, U.S.A.
- Fitzgerald, D.M., Buynevich, I.V., Davis, R.A.J. et Fenster, M.S.** 2002. New England Tidal Inlets with Special Reference to Riverine Associated Inlet Systems. *Geomorphology*, **48**: 179-208.
- Flemming, B.W.** 2000. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams. *Continental Shelf Research*, **20**: 1125-1137.
- Foda, M.A. and Tzang, S.-Y.** 1994. Resonant fluidization of silty soil by water waves. *Journal of Geophysical Research*, **99**: 20463-20475.
- Folk, R.L., Andrews, P.B. et Lewis, D.W.** 1970. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, **13**: 937-968.
- Gacia, E., Granata, T.C. et Duarte, C.M.** 1999. An approach to measurement of particle flux and sedimentation retention within seagrass (*Posidonia oceanica*) meadows. *Aquatic Botany*, **65**: 255-268.
- Galois, R., Blanchard, G.F., Seguignes, M., Huet, V. et Jossard, L.** 2000. Spatial distribution of sediment particulate organic matter on two estuarine intertidal mudflats; a comparison between Marennes-Oleron Bay (France) and the Humber Estuary (UK). *Continental Shelf Research*, **20**: 1199-1217.
- Germaneau, J. et Robert, S.** 1994. Éléments géomorphologiques de la vasière de Monportail (bassin de Marennes-Oléron). In: *Symposium sur les relations continent-zones côtières, 13-15 septembre 1994*, La Rochelle.
- Germaneau, J. et Robert, S.** 1995. Etude morpho-sédimentaire de la vasière intertidale de Monportail-Brouage (bassin de Marennes-Oléron). Atlas des faciès, Ifremer.
- Germaneau, J. et Sauriau, P.-G.** 1994. Micromorphologie de la vasière de Monportail : actions combinées de la houle et des clapots. In: *Symposium sur les relations continent-zones côtières, 13-15 septembre 1994*, La Rochelle
- Gouleau, D.** 1975. *Les premiers stades de la sédimentation sur les vasières littorales atlantiques. Rôle de l'émersion*. Thèse, Université de Nantes, Nantes, 363 pp.
- 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). *Continental Shelf Research*, **20**: 1513-1530.
- Gouletquer, P. et Le Moine, O.** 2002. Shellfish farming and Coastal Zone Management (CZM) development in the Marennes-Oleron Bay and Charentais Sounds (Charente Maritime, France): A review of recent developments. *Aquaculture International*, **10**: 507-525.
- Guillaumont, B.** 1991. Use of satellite imagery for spatial and temporal comparisons in the intertidal zone. In: *19. ECSA Symp., Estuarine and Coastal Sciences Assoc.*, Caen.
- Hatfield, W.B.** 1938. The viscosity of pseudoplastic properties of sewage sludges. *Sewage Works J.*, **10**: 3-25.

- Haven, D.S. et Morales-Alamo, R.** 1968. Occurrences and transport of faecal pellets in suspension in a tidal estuary. *Sedimentary Geology*, **2**: 141-151.
- Hawkins, A.J.S., Bayne, B.L., Bougrier, S., Héral, M., Iglesias, J.I.P., Navarro, E., Smith, R.F.M. et Urrutia, M.B.** 1998. Some general relationship in comparing the feeding physiology of suspension-feeding bivalve molluscs. *Journal of experimental marine biology and ecology*, **219**: 87-103.
- Hayes, M.O.** 1975. Morphology and sand accumulation in estuaries. *Estuarine Research*, **2**: 183-200.
- Healy, T. et Harada, K.** 1991. Definition and physical characteristics of the world's enclosed coastal seas. *Marine Pollution Bulletin*, **23**: 639-644.
- Héral, M., Razet, D., Deslous-Paoli, J.M., Manaus, F., Truquet, I. et Garnier, J.** 1984. *Hydrobiology of the Marennes-Oleron Basin. Results of the Réseau National d'Observation : 1977-1981.* Annales de la Société des Sciences naturelles de la Charente-Maritime, **7**, La Rochelle, 259-277 pp.
- Héral, M., Razet, D. et Prou, J.** 1989. Acquiring continuous data on the particular matter of the estuarine bay of Marennes-Oleron during the spring planktonic bloom: Effect on the filtration rate of the oyster *Crassostrea gigas*. In: *Counc. Meet. of the Int. Counc. for the Exploration of the Sea*, The Hague (Netherlands).
- Hily, C.** 1977. Characteristics and originality of the Pertuis Charentais area. *J. Rech. Oceanogr*, **2**: 31-38.
- Holtz, R.D. et Kovacs, W.D.** 1981. An introduction to geotechnical engineering. Englewood Cliffs, . Prentice-Hall, N.J.
- Hume, T.M. et Herdendorf, C.E.** 1988. A geomorphic classification of estuaries and its application to coastal resources management-a New Zealand example. *Ocean and Shoreline Management*, **2**: 49-274.
- Jarousseau, B.** 1997. Etude des variations spatiales fines et caractéristiques mécaniques de diverses figures sédimentaires liées aux principaux faciès sédimentaires de la vasière de Monportail-Brouage, Rapport de stage, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Vandoeuvre les Nancy.
- Jestin, H., Bassoullet, P., Le Hir, P., L'Yavanc, J. et 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. In: *Oceans'98*, **1/3**, pp. 189-194.
- Kawanisi, K. et Yokosi, S.** 1997. Characteristics of suspended sediment and turbulence in a tidal boundary layer. *Continental Shelf Research*, **17**: 859-875.
- Kervella, S., Robert, S., Pantet, A. et Jarny, S.** 2009a. Caractérisation des sédiments superficiels de la baie de Marennes-Oléron. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **13**: 261-281.
- Kervella, Y., Germain, G., Gaurier, B., Facq, J.-V., Brevers, M., Cayocca, F. et Lesueur, P.** 2009b. Experimental study of the near-field impact of an oyster table on the flow. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, **Soumis**.
- Khosrow, H.** 1999. *Liaison entre la rigidité initiale et la cohésion non drainée dans les vases molles. Relation avec la dynamique sédimentaire.* Thèse, Université de Nantes.
- Kjerfve, B.** 1986. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: *Estuarine variability* (Ed D.A. Wolfe), pp. 63-81. Academic press, New York.
- Klingebiel, A., de Resseguier, A. et Tesson, M.** 1971. Contribution à l'étude de la circulation des masses d'eau dans le bassin de Marennes-Oléron. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, **273**, no. **20**: 1783-1786.
- Kraft, J.C.** 1971. Sedimentary facies patterns and geologic history of a Holocene marine transgression. *Geological Society American Bulletin*, **82**: 2131-2158.

- Krieger, I.M. et Dougherty, T.J.** 1959. A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of the society of rheology*, **III**: 137-152.
- Krishnan, G.P., Beimfohr, S. et Leighton, D.T.** 1996. Shear-induced radial segregation in bidisperse suspensions. *Journal of Fluid Mechanics*, **321**: 371-393.
- Kusuki, Y.** 1978. Fundamental studies on the deterioration of oyster growing grounds. 3. Sinking rates and distance of transport of the faeces of Japanese oyster. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish*, **44**: 971-973.
- Larkum, A.W.D., Orth, R.J. et Duarte, C.M.** 2007. *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Springer, 691 pp.
- Lawler, D.M.** 2005. The importance of high-resolution monitoring in erosion and deposition dynamics studies: examples from estuarine and fluvial systems. *Geomorphology*, **64**: 1-23.
- Lazure, P. et Jegou, A.-N.** 1998. 3D modelling of seasonal evolution of Loire and Gironde plumes on Biscay Bay continental shelf. *Oceanologica acta*, **21**: 165-177.
- Le Hir, P.** 2008. Aide mémoire de dynamique sédimentaire, Ifremer, Brest.
- Le Hir, P., Ficht, A., Silva Jacinto, R., Lesueur, P., Dupont, J.P., Lafite, R., Brenon, I., Thouvenin, B. et Cugier, P.** 2001. Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine Estuary (France). *Estuaries*, **24**: 950-963.
- Le Hir, P., Monbet, Y. et Orvain, F.** 2007. Sediment erodability in sediment transport modelling: Can we account for biota effects? *Continental Shelf Research*, **27**: 1116-1142.
- Le Hir, P., Robert, S., Chaumillon, E. et Walker, P.** 2006. Etude pour une gestion dynamique des sédiments sur les côtes du bassin de Marennes-Oléron et le pertuis de Maumusson. Lot 5 : Mesures et analyses - Impact des mers de vent et des courants. 104213, Ifremer.
- Le Hir, P., Roberts, W., Cazaillet, O., Christie, M., Bassoullet, P. et Bacher, C.** 2000. Characterisation of intertidal flat hydrodynamics. *Continental Shelf Research*, **20**: 1433-1459.
- Le Hir, P., Waeles, B. et Cayocca, F.** 2009. Dynamics of sand and mud mixtures: a new modelling strategy. *Continental Shelf Research*, **Soumis**.
- Leclerc, J.P., Bellesort, B. et Migniot, C.** 1976. Action de la houle sur les sédiments, LCHF.
- Lee, H.J., Jo, H.R., Chu, Y.S. et Bahk, K.S.** 2004. Sediment transport on macrotidal flats in Garolim Bay, west coast of Korea: significance of wind waves and asymmetry of tidal currents. *Continental Shelf Research*, **24**: 821-832.
- Legeron, S.** 1994. Essais méthodologiques sur des vases de marais et d'estran - Travaux géomécaniques sur des vases du bassin de Marennes-Oléron, Rapport de stage, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Vandoeuvre les Nancy.
- Lesourd, S., Brun-Cottan, J.C., Lesueur, P., Deloffre, J., Lafite, R., Caillaud, J. et Philippe, S.** 2005. Etude du tassement des vases de l'estuaire de la Seine : Rapport Final du programme Seine-Aval 2004, action physique et sédimentologique.
- Lindenberg, J., Van Rijn, L.C. and Winterwerp, J.C.** 1989. Some experiments on wave induced liquefaction of soft cohesive soil. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 5, High Concentration Cohesive Sediment Transport, edited by A.J. Mehta and E.J. Hayter: 127-137.
- Liu, K.F. et Mei, C.C.** 1989. Effects of wave-induced friction on a muddy seabed modelled as a Bingham-plastic fluid. *Journal of Coastal Research*, **5**: 777-789.
- Magnin, A. et Piau, J.M.** 1990. Cone and plate rheometry of yield stress fluids. Study of an aqueous gel. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanical*, **36**: 85-108.
- 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., Friend, P.L., Prowse, N. et Amos, C.L.** 2007. Estuarine mud flocculation properties determined using an annular mini-flume and the LabSFLOC system. *Continental Shelf Research*, **27**: 1080-1095.

- Mansoutre, S.** 2000. *Des suspensions concentrées aux milieux granulaires lubrifiés. Etude des pâtes tricalciques*. Thèse, Université d'Orléans, Orléans.
- Martin, J.L., Sornin, J.M., Delmas, D., El Sayed, M. et Berthet, B.** 1989. La biodéposition dans les aires conchylicoles. Son rôle dans la concentration de matière organique et de contaminants potentiels. Son impact sur le sédiment., Ifremer.
- Massard, E.** 2007. Incertitudes des mesures bathymétrique : évaluation et application sur les levés bathymétriques de la Seudre et sur le banc ostréicole du bassin de Marennes-Oléron, Ifremer, Stage M2 professionnel.
- Masson, P.** 1973. *Contribution à l'étude sédimentologique des côtes charentaises. Estuaire de la Gironde, presqu'île d'Arvert, île d'Oléron*. Thèse, Université d'Orsay-Paris Sud, Paris, 126 pp.
- Maurin, J.-C., Renaud, K. et Robert, S.** 2003. Geomorphological analysis of a macrotidal mudflat (Marennes-Oleron) from aerial photographs. In: *9th French Congress on Sedimentology* **38**.
- Mehta, A.J.** 1991. Review notes on cohesive sediment erosion. In: *Coastal sediment 1991: Proceedings of a Specialty Conference on Quantitative Approaches to Coastal Sediment Processes*, **0-87262-808-6**, pp. 40-53. ASCE, New-York.
- Mei, C.C. et Liu, K.F.** 1987. A Bingham-plastic model for a muddy seabed under long waves. *Journal of Geophysical Research*, **92**: 14581-14594.
- Merckelbach, L.M.** 2000. *Consolidation and strength evolution of soft mud layers*, Delft Univ. of Technology, 151 pp.
- Meybeck, M.** 1982. Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, **282**: 401-450.
- Migeon, S., Weber, O., Faugeres, J.-C. et Saint-Paul, J.** 1999, SCOPIX : A new X-ray imaging system for core analysis, *Geo-Marine Letters*, **18**, pp 251-255
- Migniot, C.** 1968. Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. *La Houille Blanche*, **7**: 591-620.
- Migniot, C.** 1977. Effect of currents, waves and wind on sediment. *La Houille Blanche*, **1**: 9-47.
- Migniot, C.** 1982. *Etude de la dynamique sédimentaire marine, fluviale et estuarienne*. Thèse de doctorat d'état es-Sciences naturelles, Université de Paris-Sud, Paris.
- Migniot, C.** 1989. Tassement et rhéologie des vases. Première partie. *La Houille Blanche*, **1**: 11-29.
- Mitchener, H. et Torfs, H.** 1996. Erosion of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering*, **29**: 1-25.
- Morvan, M., Espinat, D., Lambard, J. et Zemb, T.** 1994. Ultrasmall- and small-angle X-ray scattering of smectite clay suspensions. *Colloids Surf A* **82**: 192-203.
- Monsen N.E., Cloern J.E., Lucas L.V., Monismith S.G.** 2002. A comment on the use of flushing time, residence time and age as transport time scales. *Limnol. Oceanogr.* **47**, 1545-1553.
- Nagakawa, H. et Nezu, I.** 1975. Turbulence of open channel flow over smooth and rough beds. *Proc. Japan Soc. Civ. Eng.*, **241**: 155-168.
- Nguyen, Q.D. et Boger, D.V.** 1987. Thixotropic behaviour of concentrated bauxite residue suspensions. *Rheological Acta*, **26**: 508-515.
- Nielsen, P.** 1992. Coastal bottom boundary layers and sediment transport. In: *World Scientific*, pp. 324, Singapore.
- Nikuradse, J.** 1933. *Stromungsgesetze in rauhen Rohren*. Forsch. Geb d. Ing Wesens, Heft, 361p pp.

- Orvain, F.** 2002. *Modélisation de la bioturbation et de ses conséquences sur les flux de remise en suspension des sédiments cohésifs en baie de Marennes-Oléron*. Thèse, université de la Rochelle, la Rochelle.
- Orvain, F., Sauriau, P.-G., Le Hir, P., Guillou, G., Cann, P. et Paillard, M.** 2007. Spatio-temporal variations in intertidal mudflat erodability: Marennes-Oléron Bay, western France. *Continental Shelf Research*, **27**: 1153-1173.
- Orvain, F., Sauriau, P.G., Sygut, A., Joassard, L. et Le Hir, P.** 2004. Interacting effect of *Hydrobia ulvae* bioturbation and microphytobenthos on the erodibility of mudflat sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **278**: 205-223.
- Ostwald, W.** 1925. About the rate function of the viscosity of dispersed systems. *Kolloid-Z.*, **36**: 99-117.
- Ottman, F. et Sornin, J.M.** 1982. Observations on sediment accumulation as a result of mollusk culture systems in France. In: *SITUEC*, **1**, pp. 329-337, Rio Grande, RS, Brazil.
- Parra, M., Trouky, H., Jouanneau, J.M., Grousset, F., Latouche, C. et Castaing, P.** 1998. Isotopic study (Sr-Nd) of the origin of Holocene fine-grained deposits on the Atlantic littoral, SW France. *Oceanologia Acta*, **21**: 631-644.
- Partheniades, E.** 1965. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydrology division*, **91**: 15-139.
- Paskoff, R.P.** 2004. Potential Implications of Sea-Level Rise for France. *Journal of Coastal Research* **20**: 424-434.
- Passow, U., Shipe, R.F., Murray, A., Pak, D.K., Brzezinski, M.A. et Alldredge, A.L.** 2001. The origin of transparent exopolymer particles (TEP) and their role in the sedimentation of particulate matter. *Continental Shelf Research*, **21**: 327-346.
- Paterson, D.M.** 1997. *Biological mediation of sediment erodibility : ecology and physical dynamics*. Cohesive sediments. Burt, N. Parker, R., Watts, J., London.
- Paterson, D.M. and Black, K.** 1999. Water flow, Sediment Dynamics and benthic biology. *Advances in Ecological Research*, **29**: 155-193.
- Paterson, D.M., Crawford, R.M. et Little, C.** 1990. Subaerial exposure and changes in the stability of intertidal estuarine sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **30**: 541-556.
- Paumier, S.** 2007. *Facteurs déterminants l'organisation et la rhéologie du système argile-eau pour des suspensions de smectites*. Thèse, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, Poitiers, 249 pp.
- Pejrup, M. and 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**: 1621-1634.
- Pejrup, M. and Andersen, T.J.** 2005. Long-term and high-resolution measurements of bed level changes in a temperate, microtidal coastal lagoon. In: *IntercoH 2005*, Saga, Japan.
- Perillo, G.M.E.** 1995. *Definitions and geomorphologic classifications of estuaries*. Geomorphology and sedimentology of estuaries. Developments in Sedimentology, **53**, Amsterdam.
- Petchick, J.S., Legget, D. and Husain, L.** 1990. *Boundary layer under salt marsh vegetation developed in tidal currents*. Wiley, J. & Sons, Vegetation and erosion processes and environments, London.
- Pigeot, J., Miramand, P., Guyot, T., Sauriau, P.-G., Fichet, D., Le Moine, O. et Huet, V.** 2006. Cadmium pathways in an exploited intertidal ecosystem with chronic cadmium inputs (Marennes-Oleron, Atlantic coast, France). *Marine Ecology Progress Series*, **307**: 101-114.
- Pignon, F., Magnin, A. et Piau, J.M.** 1996. Thixotropic colloidal suspensions and flow curves with minimum: Identification of flow regimes and rheometric consequences. *J. Rheol.*, **40**: 573-587

- Pignon, F., Magnin, A., Piau, J.M., Cabane, B., Lindner, P. et Diat, O.** 1997. Yield stress thixotropic clay suspension: Investigations of structure by light, neutron, and x-ray scattering. *Phys. Rev.* , **E56**: 3281–3289
- Pouliquen, M.** 1975. *Etude minéralogique et géochimique des sédiments du littoral Vendéo-Charentais et de la vasière Ouest-Gironde (France) : Application à la connaissance de l'origine et de la dynamique des vases dans la baie de Marennes-Oléron*. Thèse, Université Bordeaux 1.
- Pritchard** 1967. *What is an estuary: Physical point of view*. estuaries, **83**. CD. Pub, AAAS Washington.
- Prou, J.** 1993. Estimation de la biomasse d'huîtres non cultivées dans le bassin de Marennes-Oléron, Rapport , Ifremer, Laboratoire de biologie et d'écologie des invertébrés marins.
- Quémada D.** 1997. Rhéologie et structure des suspensions concentrées, in *Des grands écoulements naturels à la dynamique du tas de sable*, B. Ildefonse, C. Allain et P. Coussot (Eds.), Cemagref Editions, 123-144
- Ravail, B., Heral, M., Maestrini, S. et Robert, J.M.** 1988. *Effect of the flow from the Charente river on the biotoc capacity of the oyster beds in the Marennes-Oleron basin*. Journal de recherche oceanographique, **13**, Paris, 48-52 pp.
- Rechlin, D.** 1995. Definition of the nautical depth in the main muddy areas of the federal waterways board. *Bulletin of the Permanent International Association of Navigation Congresses*, **86**: 18-31.
- Regrain, R.** 1980. *Physical geography and remote sensing of marshes in Charentes*. Regrain; Poitiers (Frana), 512 pp.
- Robert, S., Germaneau, J. et Sauriau, P.-G.** 1997. Caractérisation morphosédimentaire de la vasière de Monportail-Brouage (bassin de Marennes-Oléron). In: *6ème Congrès Français de Sédimentologie*. ASF, Nancy.
- Robert, S. and Gouleau, D.** 1999. Sediment dynamics on Monportail-Brouage intertidal mudflat (Marennes-Oléron Bay): erosion and deposition present processes on the different morphological facies. In: *Intertidal mudflats: properties and processes, 12-16 April 1999*, University of Plymouth, Plymouth, England.
- Robert, S., Le Hir, P. et Le Moine, O.** 2006. Etude pour une gestion dynamique des sédiments sur les côtes du bassin de Marennes-Oléron et le pertuis de Maumusson. Lot 4 : Mesures et analyses - Conchyliculture/Envasements/Sables. 104213, Ifremer.
- Robert, S., Orvain, F., Sauriau, P.-G., Guillou, G., Le Hir, P. et Paillard, M.** 2001. Apport des études d'érodabilité in situ et rheo-mécaniques à la compréhension des processus de remise en suspension des sédiments cohésifs (baie de Marennes-Oleron). Contribution of studies on in situ erodibility and rheo-mechanics to the understanding of the reworking of suspended cohesive sediments in Marennes-Oleron Bay. In: *ASF Association des Sedimentologues Français*, **36**, pp. 305-306.
- Ross, M.A. and Mehta, A.J.** 1989. On the mechanics of lutoclines and fluid mud. *Journal of Coastal Research*, **5**: 51-61.
- Sakayama, T. et Bijker, E.W.** 1988. Mass transport velocity in mud layer due to progressive waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, **115**: 614-633.
- Salomon, J.C. et Breton, M.** 1991. Courants résiduels de marée dans la Manche. In: *Oceanol. Acta, Proceedings of the International Colloquium on the environment of epicontinental seas*, **11**, pp. 47-53, Lille, 20-22 March, 1990, .
- Sauriau, P.-G., Germaneau, J., Morin, K. et Robert, S.** 1997. Zonation scheme of bedform structures from Brouage mudflat in the Marennes-Oleron bay (Atlantic coast, France), The morphological development of intertidal mudflats, INTRMUD.
- Sauriau, P.-G., Mouret, V. et Rince, J.-P.** 1989. Trophic system of wild soft-bottom molluscs in the Marennes-Oleron oyster-farming bay. *Oceanologica acta Paris*, **12**: 193-204.

- Shepard, F.P.** 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, **24**: 151-158.
- Shumway, S.E., Cucci, T.L., Newell, C.R. et Yentsch, C.M.** 1985. Particle selection, ingestion, and absorption in filter-feeding bivalves. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **91**: 77-92.
- Silva Jacinto, R.** 2002. *Action des vagues sur les estrans et vasières - Application à l'estuaire de la Seine*. Thèse, Université de Rouen, Rouen, 207 pp.
- Simpson, J.H., Williams, E., Brasseur, L.H. et Brubaker, J.M.** 2005. The impact of tidal straining on the cycle of turbulence in a partially stratified estuary. *Continental Shelf Research*, **25**: 51-64.
- Soletchnik, P., Ropert, M., Mazurié, J., Fleury, P.G. et Le Coz, F.** 2007. Relationships between oyster mortality patterns and environmental data from monitoring databases along the coasts of France. *Aquaculture*, **271**: 384-400.
- Sornin, J.M.** 1981. *Processus Sédimentaire et biodéposition liés à différents modes de conchyliculture (Baie de Cancale, Anse de l'Aiguillon et Bassin de Marennes-Oléron)*. Thèse, Institut des Sciences de la Nature de l'Université de Nantes, Nantes, 188 pp.
- Sornin, J.M.** 1982. Influences des installations conchylicoles sur l'hydrologie et sur la morphologie des fonds. *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, **45**: 127-139.
- Sornin, J.M.** 1984. Rôle et conséquences de la biodéposition à l'interface eau/sédiment. *J. Rech. Oceanogr*, **9**: 38-40.
- Sornin, J.M., Feuillet, M., Héral, M. et Deslous-Paoli, J.M.** 1983. Effet des biodépôts de l'Huître *Crassostrea Gigas* (Thunberg) sur l'accumulation de matières organiques dans les parcs du bassin de Marennes-Oléron. *J.Moll.Stud (suppt)*, **12**: 185-197.
- Soulsby, R.L.** 1983. *The bottom boundary layer of shelf seas*. Elsevier, Physical oceanography of coastal and shelf seas, AMsterdam.
- Soulsby, R.L.** 1997. *Dynamics of marine sands. A manual for practical applications*. Thomas Telford, London.
- Soulsby, R.L., Hamm, L., Klopman, G., Myrhaug, D., Simons, R.R. et Thomas, G.P.** 1993. Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer. *Coastal Engineering*, **21**: 41-69.
- Stanisière, J.Y., Dumas, F., Plus, M., Maurer, D. et Robert, S.** 2006. Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'un système côtier semi-fermé : Le Bassin de Marennes-Oléron. DOP/LER.LER/PC/06.1059.
- Struski, C.** 2005. *Modélisation des flux de matières dans la baie de Marennes-Oléron : Couplage de l'hydrodynamisme, de la production primaire et de la consommation par les huîtres*. Thèse, Université de la Rochelle, La Rochelle, 317 pp.
- Suhayda, J.N.** 1984. Interactions between surface waves and muddy bottom sediments, Lecture notes on Coastal and estuarine Studies, vol **14**, *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, edited by Mehta, A.J., pp 401-428.
- Stumpf, R.P.** 1983. The process of sedimentation on the surface of a salt marsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **17**: 495-508.
- Teisson, C., Ockenden, M.C., Le Hir, P., Kranenburg, C. et Hamm, L.** 1993. Cohesive sediment transport processes. *Coastal Engineering*, **21**: 41-69.
- Tesson, M.** 1973. *Aspects dynamiques de la sédimentation dans la baie de Marennes-Oléron (France)*. Thèse, Université Bordeaux 1.
- Tolhurst, T.J., Riethmüller, R. et Paterson, D.M.** 2000. In situ versus laboratory analysis of sediment stability from intertidal mudflats. *Continental Shelf Research*, **20**: 1317-1334.
- Toorman, E.** 1994. An analytical solution for the velocity and shear rate distribution of non-ideal Bingham fluids in a concentric cylinder viscometer. *Rheological Acta*, **33**: 193-202.
- Toorman, E.A.** 1995. The thixotropic behaviour of dense cohesive sediment suspensions. Report HYD149, Hydraulics Laboratory, K.U.Leuven.

- Torfs, H., Mitchener, H., Huysentruyt, H. et Toorman, E.** 1996. Settling and consolidation of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering*, **29**: 27-45.
- Toutou, Z., Lanos, C., Mélinge, Y. et Roussel, N.** 2004. Modèle de viscosité multi-échelle : de la pâte de ciment au micro-béton. *Rhéologie*, **5**, 1-9
- Trembanis, A.C., Wright, L.D., Friedrichs, C.T., Green, M.O. et Hume, T.** 2004. The effects of spatially complex inner shelf roughness on boundary layer turbulence and current and wave friction: Tairua enbayement, New Zealand. *Continental Shelf Research*, **24**: 1549-1571.
- Tubman, M.W. and Suhayda, J.N.** 1976. Wave action and bottom movements in fine sediments. In: *15th Conf. Coastal Engineering*, **Chapter 69**, pp. 1168-1183, Honolulu
- Valioulis, I.** 1980. *Relationship between settling, dewatering and rheological properties of activated sludge*. M.S. Thesis, Cornell University, Ithaca, NY.
- Van Craenenbroeck, K., Vantorre, M. et De Wolf, P.** 1991. Navigation in muddy areas: Establishing the navigable depth in the port of Zeebrugge. In: *Proc. CEDA-PIANC Conference, Accessible Harbours*, Amsterdam.
- Van Keulen, M. et Borowitzka, M.A.** 2003. Seasonal variability in sediment distribution along an exposure gradient in a seagrass meadow in Shoalwater Bay, Western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **57**: 587-592.
- Van Ledden, M.** 2003. *Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins*, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Van Ledden, M., Van Kesteren, W.G.M. et Winterwerp, J.C.** 2004. A conceptual framework for the erosion behaviour of sand-mud mixtures. *Continental Shelf Research*, **24**: 1-11.
- Van Ledden, M. et Wang, Z.B.** 2001. Sand-mud morphodynamics in an estuary. In: *Proceedings 2nd symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics Conference*, pp. 505 - 514, Obihiro, Japan.
- Van Leussen, W.** 1988. Aggregation of particles, settling velocities of mud, a review. In: *Int. Symp. Physical processes in estuaries*, pp. 347-403. Springer-Verlag, New-York.
- Verger, F.** 1968. *Marais et Wadden du littoral français*, **vol. 1**. Bordeaux Biscay frères imprimeurs, 541 pp.
- Verney, R.** 2006. *Processus de contrôle de la dynamique des sédiments cohésifs. Mesures in-situ, mesures expérimentales et modélisation. Application à l'estuaire de la Seine*. Thèse, université de Rouen, Rouen, 325 pp.
- Verney, R., Deloffre, J., Brun-Cottan, J.C. et Lafite, R.** 2007. The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudflats: Impact of boat traffic and wind. *Continental Shelf Research*, **27**: 594-612.
- Voulgaris, G. et Meyers, S.T.** 2004. Temporal variability of hydrodynamics, sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek. *Continental Shelf Research*, **24**: 1659-1683.
- Voulgaris, G. et Trowbridge, J.H.** 1998. Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **15**: 272-289.
- Waeles, B.** 2005. *Modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine*. Thèse, Université de Caen, Basse Normandie, Caen.
- Waeles, B., Le Hir, P. et Lesueur, P.** 2008. A 3D morphodynamic process-based modelling of a mixed sand/mud coastal environment: the Seine estuary, France. *Proceedings in Marine Science*, **9**: 477-498.
- Walker, P., Le Hir, P. et Chaumillon, E.** 2006. Etude pour une gestion dynamique des sédiments sur les côtes du bassin de Marennes-Oléron et le pertuis de Maumusson. Lot 2 : Mesures et analyses - Courants de marées. 104213, Ifremer.

- Wang, K.-H. et Shen, Q.** 1999. Wave motion over a group of submerged horizontal plates. *International Journal of Engineering Science*, **37**: 703-715.
- Weber, O.** 2004. *Morphologie, architecture des dépôts, évolution séculaire et millénaire du littoral Charentais*. Thèse, La Rochelle, La Rochelle, 357 pp.
- West, J.R., Knight, D.W. et Shiono, K.** 1986. Turbulence measurements in the Great Ouse Estuary. *Journal of Hydraulic Engineering*, **112**: 167-180.
- Wiberg, P.L. et Sherwood, C.R.** 2008. Calculating wave-generated bottom orbital velocities from surface-wave parameters. *Computers & Geosciences*, **34**: 1243-1262.
- Widdows, J. et Brinsley, M.** 2002. Impact of biotic and abiotic processes on sediment dynamics and the consequences to the structure and functioning of the intertidal zone. *Journal of Sea Research*, **48**: 143-156.
- Whitehouse, R.J.S., Bassoulet, P., Dyer, K.R., Mitchener, H.J. and Roberts, W.** 2000. The influence of bedforms on flow and sediment transport over intertidal mudflats. *Continental Shelf Research*, **20**: 1099-1124.
- Winterwerp, J.C. et van Kesteren, W.G.M.** 2004. *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment*, *Development in Sedimentology*, **56**. Elsevier, Amsterdam.
- Xu, J.P. et Wright, L.D.** 1995. Test of bed roughness models using field data from the Middle Atlantic Bight. *Continental Shelf Research*, **15**: 1409-1434.

Résumé

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la compréhension du fonctionnement des zones intertidales de la baie de Marennes-Oléron (Charente-Maritime, France), en fonction des facteurs anthropiques, biologiques et physiques.

Pour ce faire, le travail de recherche a été conduit selon trois études : (1) étude du comportement sédimentaire par l'application de la rhéophysique sur les sédiments superficiels de la zone intertidale ; (2) étude hydro-sédimentaire par l'identification de l'action des forçages (physiques, biologiques ou anthropiques) pour plusieurs échelles de temps (de l'événement à la saison) sur la stabilité des estrans ; (3) application spécifique du modèle SiAM-2DH sur l'ensemble de la baie de Marennes-Oléron.

Les sédiments superficiels présentent un comportement mécanique dépendant essentiellement de la fraction fine pour une composition contenant jusqu'à 60 % de sables, dans laquelle les grains ne jouent qu'un rôle d'inclusion dans le mélange. La contrainte de cisaillement globale des sédiments a pu être définie à partir de la combinaison de la fraction fine et de la fraction granulaire. Les cartes sédimentaires des zones intertidales, issues de l'étude sédimentaire, montrent la grande variabilité saisonnière de ces zones.

Il a été montré le rôle prédominant des vagues sur la remise en suspension des sédiments superficiels dans l'ensemble de la baie, l'influence affirmée de l'expulsion du bouchon vaseux de l'estuaire de la Charente sur la sédimentation de la vasière de Brouage, mais également le rôle des herbiers de zostères dans le stockage estivale des sédiments, sur le haut des estrans occidentaux.

L'utilisation de forçages réalistes (vent, marée, débit Charente, présence saisonnière des huîtres) dans les simulations a permis, en comparant les résultats numériques avec les observations, de montrer que les installations ostréicoles ont un impact très local sur la sédimentation. Ceci a permis également de préciser l'évolution sédimentaire en termes d'érosion/dépôt des zones intertidales de la baie.

Mots clés : *Rhéophysique, seuil d'écoulement, sédiments cohésifs et mixtes, sédimentation, érosion, hydrodynamique, vasière, zone intertidale, conchyliculture, herbiers de zostères, ALTUS, SiAM-2DH, baie de Marennes-Oléron.*

Abstract

This thesis aims at increasing the general knowledge on sediment dynamics of intertidal flats in the Marennes-Oléron Bay, according to physical, biological and anthropogenic factors.

The conducted research is compound of three complementary studies: (1) a study of sediment behaviour through applied rheophysics on intertidal superficial sediments; (2) a hydro-sedimentary study based on identification of the forcing action (physical, biological or anthropogenic) on the intertidal flat stability over several time scales (from the event to several months); (3) a specific application of the model SiAM-2DH to the Marennes-Oléron Bay.

The surface sediments shows a mechanical behaviour that mainly depends on the fine fraction for a composition that contains up to 60 % of sandy material, where grains play an inclusive role in the mixture. The total shear strength of sediment could be defined from the combination of granular and fine fractions. Moreover, the sedimentary maps of intertidal areas, established from the sedimentary study, show high seasonal variability of the areas.

Waves appear to have a great influence on the resuspension of surface sediment throughout the bay. The maximum turbidity expulsion of the Charente estuary highly influences the sedimentation rate in the Brouage mudflat. Seagrass meadows play an important role on the temporary sediment storage in summer, on top of the western intertidal flats.

Model simulations using realistic forcing (wind, tide, Charente flow, oyster occurrence) show that oysters have a very local impact on sedimentation. These results allow the description of the changes (erosion/deposition) occurring on the intertidal flat of the bay

Keywords: *Rheophysics, shear strenght, cohesive and mixed sediment, sédimentation, erosion, hydrodynamics, mudflat, intertidal area, oyster, seagrass meadows, ALTUS, SiAM-2DH, Marennes-Oléron Bay.*