Dynamique des sédiments fins en milieu marin et agitation portuaire

Martin Sanchez Angulo

▶ **To cite this version:**

Martin Sanchez Angulo. Dynamique des sédiments fins en milieu marin et agitation portuaire. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Caen, 2000. tel-00364322

HAL Id: tel-00364322
https://theses.hal.science/tel-00364322

Submitted on 25 Feb 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE CAEN - BASSE NORMANDIE

U.F.R. Sciences

Dynamique des sédiments fins en milieu marin et agitation portuaire

_____

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

présentée par :

Martin SANCHEZ ANGULO

soutenance le 14 janvier 2000

Membres du jury :

M. BELORGEY Michel, *Professeur à l'université de Caen*

M. BONNEFILLE René, *Professeur à l'ENSTA* (*Rapporteur*)

M. GROVEL Alain, *Professeur à l'université de Nantes*

M. LARSONNEUR Claude, *Professeur à l'université de Caen*

M. LEVACHER Daniel, *Professeur à l'université de Caen*

M. MIGNIOT Claude, *Docteur-ès-sciences, Charenton-le-Pont* (*Rapporteur*)

M. NGUYEN Dan, *Professeur à l'université de Caen*

Directeur : M. Michel BELORGEY

AVANT-PROPOS

Mes travaux de recherche sous la direction du Professeur A. Grovel, ont fait l'objet d'une thèse de doctorat sous le titre : "Modélisation dans un estuaire à marée. Rôle du bouchon vaseux dans la tenue des sols sous marins", soutenue à l'université de Nantes le 10 juillet 1992, devant le jury composé par : M. Bélorgey, C. Larsonneur, J. Chapon, A. Graillot, A. Grovel et P. Jouve.

Depuis 1992, les recherches que je mène se situent dans le cadre de l'hydraulique maritime appliquée aux travaux maritimes. Ces recherches concernent principalement les problèmes d'aménagement portuaire et côtier, car les résultats de celles-ci apportent des éléments de réflexion aux ingénieurs en génie côtier, lesquels doivent tenir compte des contraintes environnementales propres à chaque site dans la conception des ouvrages maritimes. Il se pose alors quatre types de problèmes indissociables :

a) l'étude des conditions environnementales locales comprenant la mesure de la houle in situ, l'étude de la marée extrême locale et l'étude des couches sédimentaires mobilisables sous contraintes hydrodynamiques,
b) l'étude de l'implantation des ouvrages de protection contre la houle afin d'assurer une navigation en toute sécurité garantie par une modélisation fine de l'agitation portuaire, tenant compte de la houle incidente et des réflexions de la houle par les frontières latérales,
c) l'analyse de la stabilité d'ouvrages de génie civil nécessitant une connaissance approfondie de la houle de projet, de la marée, et de la tenue des sols marins,
d) l'examen de l'impact sédimentaire causé par les ouvrages de protection sur les problèmes d'ensablement, d'envasement et d'érosion.

Les trois principaux thèmes sur lesquels je travaille actuellement à la Faculté des Sciences et des Techniques de Nantes, sont tous liés aux problèmes décrits ci-dessus ; les deux premiers ont des points communs avec ma thèse de doctorat et le troisième est un thème de recherche que j'étudie depuis 1994. Ces trois thèmes sont :

1) les processus sédimentaires des vases,
2) les problèmes hydrosédimentaires dans les estuaires et les zones côtières,
3) l'agitation portuaire.

Ces thèmes sont développés respectivement dans les chapitres 1, 2 et 3 de ce mémoire, ensuite, les différentes activités liées à la recherche auxquelles j'ai participées depuis 1992 sont décrites au chapitre 4 et finalement les conclusions et perspectives sont présentées.

SOMMAIRE

INTRODUCTION **1**

LES PROCESSUS SÉDIMENTAIRES DES VASES **5**

PROCESSUS DE DÉCANTATION ET DE TASSEMENT **5**

DESCRIPTION DES PHÉNOMÈNES 6

MODÉLISATION DES PHÉNOMÈNES 8

APPLICATIONS DE LA MODÉLISATION DES PHÉNOMÈNES 10

Influence de la salinité sur le tassement 10

Modélisation du tassement des vases non saturées 11

Formation de la crème de vase 12

PROCESSUS D'ÉROSION DES VASES **13**

RHÉOLOGIE DES VASES 14

TAUX D'ÉROSION DES VASES 18

SYNTHÈSE DES ÉTUDES SUR LES PROCESSUS SÉDIMENTAIRES DES VASES **23**

RÉFÉRENCES EN RELATION AVEC L'ÉTUDES DES PROCESSUS SÉDIMENTAIRES DES VASES **24**

LES PROBLEMES HYDROSÉDIMENTAIRES DANS LES ESTUAIRES ET LES ZONES CÔTIÈRES **25**

DIFFICULTÉS LIÉES À LA MODÉLISATION **25**

APPLICATIONS DE LA MODÉLISATION HYDRAULIQUE EN LOIRE **27**

ENVASEMENT DU PORT-ABRI DE TRENTEMOULT 27

ÉTUDE D'UNE VANNE RÉGULATRICE DES NIVEAUX EN LOIRE 27

MODÉLISATION MULTICOUCHE DE L'HYDRAULIQUE DE L'ESTUAIRE 29

OBSERVATIONS DE LA CRÈME DE VASE EN LOIRE **30**

ESTIMATION DU TAUX D'ENVASEMENT DU CHENAL DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE **32**

IMPACT DES TRAVAUX D'AMÉNAGEMENT SUR LA DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE EN LOIRE **33**

TAUX D'ENVASEMENT RÉSIDUEL DU CHENAL DE L'ESTUAIRE EN FACE DE MONTOIR 33

TAUX D'ENVASEMENT D'UNE SOUILLE DANS L'ESTUAIRE (PORT DE TRENTEMOULT) 34

ÉROSIONS PRÉVISIBLES PAR L'ACCROISSEMENT DES VITESSES DANS UN POINT EN ÉQUILIBRE SÉDIMENTAIRE 36

ÉTUDE DU DÉSENVASEMENT PAR AGITATION **36**

SYNTHÈSE DES ÉTUDES SUR LES PROBLÈMES HYDROSÉDIMENTAIRES **38**

RÉFÉRENCES EN RELATION AVEC LES PROBLÈMES HYDROSÉDIMENTAIRES **38**

L'AGITATION PORTUAIRE **39**
MODÉLISATION DE L'AGITATION DANS UN BASSIN PORTUAIRE **39**
MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES PHÉNOMÈNES DE DIFFRACTION ET DE RÉFLEXION 39
ÉTUDE DE LA RÉPARTITION DE L'AGITATION DANS UN PORT 41
APPLICATIONS PRATIQUES DU MODÈLE D'AGITATION PORTUAIRE 43
MESURE DE LA HOULE EN ZONE CÔTIÈRE **45**
ÉVALUATION DU COEFFICIENT DE RÉFLEXION DES FRONTIÈRES LATÉRALES **46**
ÉTUDE DE LA RÉFLEXION À PARTIR DE L'OBSERVATION DES TRAJECTOIRES DES PARTICULES D'EAU EN SURFACE 47
ÉTUDE DE LA RÉFLEXION À PARTIR DES MESURES DES NIVEAUX ET DES PENTES DE LA SURFACE LIBRE DE L'EAU 51
EFFETS LIÉS AUX PROFONDEURS FAIBLES ET INTERMÉDIAIRES 53
MESURES DE LA RÉFLEXION EN CANAL À HOULE 54
Réflexion due à une plage rigide de pente faible 55
Réflexion et transmission à travers un brise-lames immergé 58
APPORTS DE LA MÉTHODE À LA COMPRÉHENSION DE LA RÉFLEXION 62
RÉFÉRENCES EN RELATION AVEC L'AGITATION PORTUAIRE ET LA PROPAGATION DE LA HOULE **64**

ACTIVITÉS LIÉES A L'ENSEIGNEMENT, À L'ADMINISTRATION ET À LA RECHERCHE **65**
ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT **65**
ENSEIGNEMENT EN PREMIER ET EN DEUXIÈME CYCLE 65
ENSEIGNEMENT EN TROISIÈME CYCLE 66
ACTIVITÉS D'ADMINISTRATION ET AUTRES RESPONSABILITÉS COLLECTIVES **66**
ENCADREMENT DE RECHERCHES **67**
ENCADREMENT ET CO-ENCADREMENT DE THÈSES 67
ENCADREMENT DE DEA 68
ENCADREMENT DE PROJETS DE FIN D'ÉTUDES DE L'ÉCOLE NAVALE DU POULMIC 69

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES **71**

ANNEXE A - CURRICULUM VITAE **77**

ANNEXE B - LISTE DES PUBLICATIONS **79**

INTRODUCTION

Au cours de la préparation de ma thèse de doctorat j'ai abordé l'étude des processus sédimentaires impliqués dans les transferts verticaux des sédiments fins : le dépôt des matières en suspension en eau calme, le tassement des vases fraîchement déposées, la consolidation des dépôts et l'érosion. Les relations entre ces processus et la perméabilité, le comportement mécanique à la compressibilité et le comportement rhéologique des vases, ont été étudiées.

Mon travail de thèse montre que les trois premiers processus sédimentaires décrits ci-dessus peuvent être simulés par un modèle unifié de tassement alors qu'habituellement ils étaient étudiés en suivant trois approches différentes :

- le dépôt des matières en suspension en eau calme, par des lois empiriques reliant la vitesse de chute moyenne à la concentration en matières en suspension (MES) (Migniot 1989 *in* A.2; Thorn 1981 *in* A.2),
- la sédimentation des sédiments dépourvus de contraintes effectives, par des modèles tenant compte du coefficient de perméabilité des sédiments (Kynch 1952 *in* A.2; Been 1980 *in* A.2; Tan et al. 1988 *in* A.2),
- la consolidation des dépôts consolidés, par des modèles non linéaires de consolidation issus de la mécanique des sols (Gibson et al. 1967 *in* A.2).

De plus, des mesures de la rigidité initiale sur des vases molles de l'estuaire de la Loire qui sont représentatives de la crème de vase de ce site, ont montré que celle-ci est très sensible à la température, dont la valeur, à concentration constante, peut varier du simple au double pour des températures correspondant respectivement à l'été et à l'hiver.

Mes études sur les processus sédimentaires affectant les vases se sont poursuivies après ma thèse de doctorat en collaboration avec des chercheurs en thèse et en DEA. Les principaux aspects abordés sont :

- l'influence de la salinité sur le tassement des vases molles,
- le rôle de la floculation sur le tassement,
- la relation entre la rigidité initiale et la cohésion non drainée,
- l'érosion des vases en laboratoire,
- la formation des copeaux à partir de l'érosion des vases déposées.

En parallèle, les résultats de ces recherches ont été appliqués en grandeur réelle pour étudier les problèmes hydrosédimentaires dans l'estuaire de la Loire et dans d'autres sites. Les principales applications sont :

- l'étude de l'envasement dans 3 ports,
- l'explication de la formation de la crème de vase,
- l'évaluation du taux d'envasement du chenal de l'estuaire de la Loire,
- la délimitation entre les fonds sableux et vaseux dans l'estuaire de la Loire,
- l'étude de l'évolution morphologique de l'estuaire de la Loire à Nantes,
- l'étude de l'impact d'ouvrages de génie civil sur l'hydraulique des estuaires.

Usuellement, l'étude de la sédimentologie des estuaires est réalisée grâce à la mise au point de modèles mathématiques, où un modèle hydrodynamique principal est couplé à d'autres modèles qui permettent la simulation de l'évolution de la salinité, du transport dispersif des matières en suspension, de la diffusion verticale des sédiments, et des différents processus sédimentaires tels que la floculation, le dépôt, la formation de crème de vase, le tassement, et l'érosion des sédiments.

Des progrès très importants ont été accomplis dans la modélisation grâce aux apports d'un grand nombre de chercheurs qui se préoccupent de ces problèmes partout dans le monde. On peut également s'attendre à de très importantes améliorations dans les années à venir et ceci grâce notamment, à une automatisation des mesures, surveillant en continu l'évolution d'une multiplicité de paramètres dans les estuaires.

Bien que les modèles constituent un outil fort utile pour la gestion des estuaires, la qualité des résultats que l'on peut obtenir à nos jours d'une modélisation globale des processus hydrosédimentaires n'est pas complètement satisfaisante du fait de la complexité du problème. Les précisions possibles, par ordre décroissant, selon les différents aspects étudiés sont :

- reproduction des courbes de marée (très précise),
- simulation des courants (précise),
- évolution de la salinité (bonne précision),
- simulation de la dynamique sédimentaire (moyenne précision).

Afin de répondre à l'attente des ingénieurs à la recherche de résultats concrets utilisables au plus vite, j'ai mis au point ou amélioré des modèles simplifiés, découplés d'un modèle hydrodynamique qui reste indispensable, pour aborder trois types de problèmes liés à l'impact sédimentaire des travaux d'aménagement. On peut ainsi aborder les cas suivants :

- l'augmentation des vitesses du courant, qui se traduit éventuellement par une érosion des fonds,
- la diminution des vitesses qui se traduit par un incrément du taux d'envasement affectant les dragages d'entretien,
- les dragages des souilles, qui peuvent s'accompagner par des taux d'envasement excessivement élevés selon le site.

La précision des résultats pouvant être obtenus par ces approches est étroitement liée à la connaissance des propriétés mécaniques des sédiments et de la sédimentologie globale du site, de même qu'à la qualité de la modélisation hydrodynamique. Les mesures in situ et en laboratoire sont toujours nécessaires.

Le troisième thème sur lequel je travaille, concerne la propagation de la houle et l'agitation portuaire.

Un modèle numérique a été construit par moi-même à partir de l'équation de Helmholtz appliquée à la houle. Ce modèle simule l'agitation dans un bassin portuaire. Il s'agit d'un modèle bidimensionnel dans le plan horizontal où la répartition verticale des vitesses est également considérée. L'étude de la propagation de la marée dans un port est possible en tenant compte de la morphologie locale et des coefficients de réflexion des frontières latérales.

La réflexion peut provoquer dans les ports des problèmes de résonance d'ondes très nuisibles aux activités portuaires. Ces problèmes sont en relation directe avec les coefficients de réflexion des parois, dont les mesures sont possibles par une méthode originale que j'ai développée. Cette méthode, qui a été validée avec succès en laboratoire, peut s'appliquer aussi sur le terrain grâce à des sondes capacitives mises au point en collaboration avec d'autres chercheurs.

CHAPITRE I

LES PROCESSUS SÉDIMENTAIRES DES VASES

PROCESSUS DE DÉCANTATION ET DE TASSEMENT

Les sédiments fins issus du lessivage des sols continentaux sont transportés en suspension par les rivières et les fleuves et ne se déposent qu'aux endroits où les eaux sont calmes. Les sites où ces sédiments s'accumulent sont : les barrages, les lacs, les zones latérales des fleuves, les estuaires et les zones océaniques protégées de l'action de la houle.

Mes travaux concernent particulièrement l'étude des processus sédimentaires dans les estuaires, qui sont le site d'un mélange d'eau douce fluviale et d'eau salée marine. Ce mélange est accompagné d'une grande quantité de phénomènes de type physique, chimique et biologique, qui entraînent une dynamique sédimentaire toute particulière.

La dynamique sédimentaire d'un estuaire est composée de nombreux processus sédimentaires interdépendants qui sont très étroitement liés à l'hydrodynamique locale et aux propriétés caractéristiques des vases de chaque estuaire.

Une description des principaux mécanismes sédimentaires en relation avec l'hydraulique de ces sites est présentée dans les références A.1, A.4 et A.5, où les travaux d'autres auteurs sont cités.

Dans l'estuaire de la Loire, où j'effectue la plupart de mes recherches, et dans d'autres estuaires mésotidaux, on observe en vives-eaux la présence d'eaux très chargées de vases en suspension dont la concentration est largement supérieure à celle observée dans la partie fluviale où dans la zone océanique adjacente.

Dans l'estuaire de la Loire, on observe que la dynamique de la vase est associée au cycle bimensuel des marées de la façon suivante (CSEEL 1984 *in* A.4) :

- dès que les coefficients de marée tombent au-dessous de 70, la presque totalité des vases en suspension se dépose rapidement pour former au fond une lentille de crème de vase,
- la crème de vase subit un tassement au cours des 5 ou 6 jours de mortes-eaux,
- dès que les coefficients de marée dépassent 75 à 80, la crème de vase est remise en suspension et il ne reste au fond que la fraction ayant atteint une rigidité suffisante au cours du tassement, pour résister aux actions hydrodynamiques de vives-eaux.

En Loire, la formation de crème de vase est observée principalement dans le chenal de l'estuaire ; elle peut atteindre 2 à 3 m d'épaisseur avec des concentrations entre 100 kg m^{-3} et 300 kg m^{-3} (pour des concentrations supérieures, la rigidité de la vase empêche tout mouvement longitudinal suivant le courant et l'on parle alors de dépôt vaseux) et peut s'étendre sur une vingtaine de kilomètres en étiage et sur 5 km en crue (CSEEL 1984 *in* A.4).

L'emplacement de la crème dépend du débit du fleuve (Gallenne 1974 *in* A.4). En étiage, cette formation peut remonter jusqu'à la ville de Nantes et en grande crue elle n'est observée qu'à proximité de l'embouchure.

La modélisation des processus sédimentaires des vases doit s'appuyer d'abord sur les travaux descriptifs de ces processus, parmi lesquels on peut citer ceux de Migniot (1989 *in* A.1) touchant l'ensemble des processus et ceux de Partheniades et de Krone (1984 *in* T.3)

concernant l'évolution de la structure interne des sédiments au cours du tassement. De même, cette modélisation n'est possible que grâce à l'étude approfondie et systématique du comportement mécanique des vases qui dépend de leur composition : phase minérale, phase fluide et matière organique, principalement (A.1, T.2, T.3).

DESCRIPTION DES PHÉNOMÈNES

La période d'eaux calmes qui se présente lors des renverses des courants de marée permet la chute des sédiments fins en suspension. La chute d'une partie de ces sédiments se trouvant en permanence sous forme d'agrégats se produit très rapidement et d'autant plus vite que le diamètre des agrégats est grand. Les matières dissoutes ne tombent à leur tour que lorsqu'elles forment des agrégats par le phénomène de floculation.

Des mesures des vitesses de chute en eau calme en fonction de la concentration (Migniot 1968 *in* A.6, Thorn 1981 *in* A.2, Sanchez 1992-A.1) ont montré que pour des concentrations faibles la vitesse de chute augmente régulièrement avec la concentration, mais à partir d'une certaine concentration (de l'ordre de 5 à 10 kg m^{-3}, selon le sédiment étudié), la vitesse de chute commence à diminuer quand la concentration augmente (figure 1). Il est important de remarquer que cette même tendance est observée sur tous les sédiments fins, mais la courbe reliant la vitesse de chute à la concentration varie d'un sédiment à un autre.

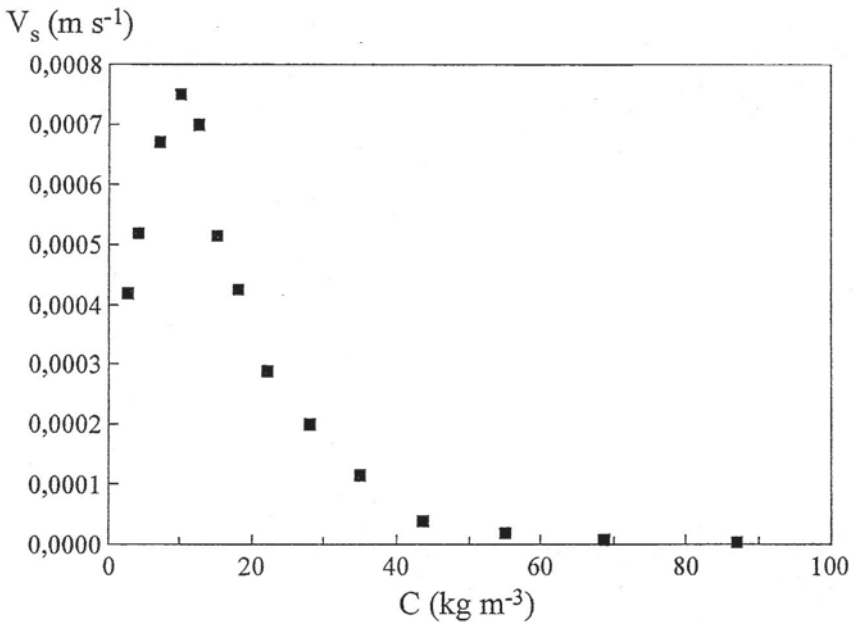


Figure 1 - Variation de la vitesse de chute d'une vase de Loire en fonction de la concentration -mesures en laboratoire- (Sanchez 1992-A.1)

Migniot (1989 *in* A.2) a étudié en laboratoire simultanément les processus de sédimentation et de tassement de plus de 30 vases d'origines diverses. Le suivi de l'évolution de la concentration moyenne d'un culot de tassement en fonction du temps (figure 2) lui permet de distinguer d'une façon générale plusieurs phases.

Au début du processus, les particules élémentaires constituant la vase vont s'agglomérer pour former des agrégats dont la vitesse de chute est nettement plus importante que celle des particules à l'état individuel, c'est la floculation qui dure quelques minutes en moyenne. Ensuite, on observe successivement la chute des flocons à vitesse entravée, la première phase de tassement avec l'élimination d'une partie d'eau interstitielle libre. La deuxième phase de tassement, plus lente, correspond à l'évacuation de l'eau par les puits de drainage qui se sont formés, et enfin, la troisième phase de tassement très lente, se traduit par un arrangement de la structure du dépôt et une perte d'eau des couches adsorbées.

Si ces différentes phases du phénomène de tassement sont toujours observées, on doit aussi signaler que chaque matériau a sa propre courbe de tassement qui dépend également des conditions initiales.

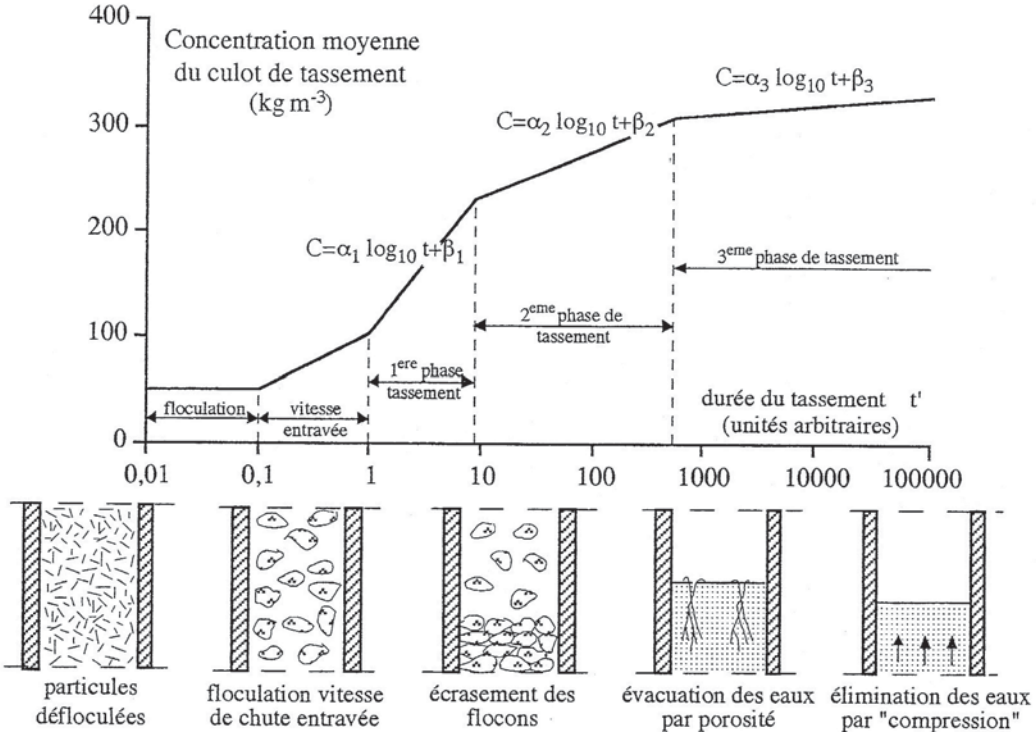


Figure 2 - Les différentes phases du tassement (d'après Migniot 1989 *in* A.2).

Si l'on reprend les théories de sédimentation de Kynch (1952 *in* A.2) et de consolidation de Gibson (1967 *in* A.2), le tassement des vases peut se subdiviser en deux phases : la première de sédimentation en l'absence des contraintes effectives et la deuxième de consolidation qui commence quand ces contraintes apparaissent.

Carrier *et al.* (1983 *in* A.2) à partir d'essais réalisés en laboratoire sur des boues d'origines très diverses, ont déterminé que pour des buts pratiques, on peut considérer que la limite entre les phénomènes de sédimentation et de consolidation (apparition des contraintes effectives) correspond à une teneur en eau égale à environ 7 fois la limite de liquidité du matériau. Ce critère permet d'écrire :

$$C_o = \rho_o \left[\frac{\rho_o}{\rho_s} + \frac{7W_L}{100} \right]^{-1} \qquad (1)$$

où ρ_o est la masse volumique de l'eau ($\rho_o \approx 1000$ kg m^{-3}), ρ_s la masse de la phase solide de la vase (en Loire, $\rho_s \approx 2550$ kg m^{-3}), W_L la limite de liquidité du matériau (teneur en eau en %) et C_o est la concentration correspondant à l'apparition des contraintes effectives. Si l'on applique cette relation à la vase de Loire dont la limite de liquidité est de 125% (Ouraq 1996-T.3), on obtient C_o=105 kg m^{-3}.

MODÉLISATION DES PHÉNOMÈNES

Un modèle unifié de sédimentation et de consolidation des vases molles sous poids propre a été mis au point par Tan *et al.* (1990 *in* A.2). Selon ce modèle la vitesse de tassement à l'intérieur d'une couche de vase est donnée par :

$$V_s = -\frac{k}{\rho_s}\left[\frac{\rho_s}{\rho_o} - 1\right] C\left[1 + \frac{\rho_s}{gC\left(\rho_s - \rho_o\right)}\frac{\partial \sigma'}{\partial z}\right] \qquad (2)$$

où C est la concentration [kg m^{-3}], k le coefficient de perméabilité [m s^{-1}], z la coordonnée verticale [m] et σ' la contrainte effective [Pa].

La relation entre la contrainte effective et la concentration dans une vase normalement consolidée peut être déterminée en étudiant le profil vertical de la concentration dans une colonne de consolidation. En effet, en fin du processus de consolidation (lorsque les surpressions interstitielles sont nulles), en tout point sur la verticale on a : $\sigma=\sigma'$, où σ est la contrainte de consolidation appliquée. La contrainte de consolidation au niveau z est due au poids propre déjaugé de la vase au-dessus de ce niveau, et donnée par :

$$\sigma(z) = \left[1 - \frac{\rho_o}{\rho_s}\right] g \int_z^H C\, dz \qquad (3)$$

où H est la cote de la surface de la couche de vase. En mesurant la concentration C en fonction de z, on peut alors ajuster une loi de variation de σ' en fonction de C. Une loi que je propose (Sanchez 1992-A.1) s'écrit comme suit :

$$C = C_o + B_1\, \sigma'^{B_2} \qquad (4)$$

où B_1 et B_2 sont des paramètres propres à chaque vase ; la valeur de B_2 est comprise entre 0 et 1. Cette loi permet de satisfaire la condition $\sigma'=0$, pour $C=C_o$. Inversement, la contrainte effective en fonction de la concentration de la vase est :

$$\sigma' = \left[\frac{C - C_o}{B_1}\right]^{1/B_2} \quad \text{, pour : } C \geq C_o \qquad (5a)$$

$$\sigma' = 0 \quad \text{, pour : } C < C_o \qquad (5b)$$

A partir de l'étude de 7 colonnes de tassement de vase en laboratoire, Sanchez (1992-A.1) détermine les valeurs suivantes : B_1=93,3 (unités du système international) et B_2=0,122.

Selon les valeurs de σ et de σ', plusieurs cas peuvent se présenter in situ :

a) si $\sigma<\sigma'$, la vase est surconsolidée mais ne gonfle pas car son comportement est plastique ; ce cas peut se produire à la suite d'une érosion des couches supérieures de la vase déchargeant les couches sous-jacentes,
b) si $\sigma=\sigma'$, la vase est normalement consolidée ; c'est ce cas qui est observé en laboratoire dans une colonne de tassement en fin du processus de consolidation,

c) si $\sigma>\sigma'$, la vase est sous-consolidée et donc en cours de consolidation.

La consolidation ne peut se produire que si $\sigma>\sigma'$, dans le cas contraire la vitesse de tassement est toujours nulle.

Lorsque l'influence du terme correspondant à la contrainte effective sur la vitesse de tassement peut être négligée, l'équation 2 devient (Been 1980 *in* A.2) :

$$V_s = -\frac{k}{\rho_s}\left[\frac{\rho_s}{\rho_o} - 1\right]C \qquad (6)$$

Au cours de mes recherches, j'ai montré que cette dernière équation peut permettre de simuler le tassement de vases molles même si les contraintes effectives sont présentes, mais à condition que celles-ci restent faibles (Sanchez 1992-A.1). Ceci a pu être vérifié pour plus de 30 vases différentes étudiées par Migniot (1989 *in* A.2) au Laboratoire Central d'Hydraulique de France LCHF, lors d'une étude qui est résumée dans un rapport (Sanchez 1992-C.1).

On constate que d'une façon générale, le coefficient de perméabilité en fonction de la concentration est approché par la loi empirique suivante :

$$k = A_1 \exp\left(-A_2 \frac{C}{\rho_s}\right) \qquad (7)$$

où A_1 [m s^{-1}] et A_2 sont des paramètres propres à chaque vase. Cette loi de variation de k a été vérifiée expérimentalement entre autres pour des vases molles de l'estuaire de la Loire ayant des concentrations comprises entre 50 kg m^{-3} et 300 kg m^{-3} (figure 3).

A partir de mesures du tassement, Sanchez et Grovel (1994-A.4) ont déterminé A_1=8x10^{-3} m s^{-1} et A_2=118. Ces valeurs ont été évaluées directement dans les courbes de tassement par une méthode graphique développée par Kynch (1952 *in* A.2) et modifiée par Sanchez et Grovel (1994-B.2).

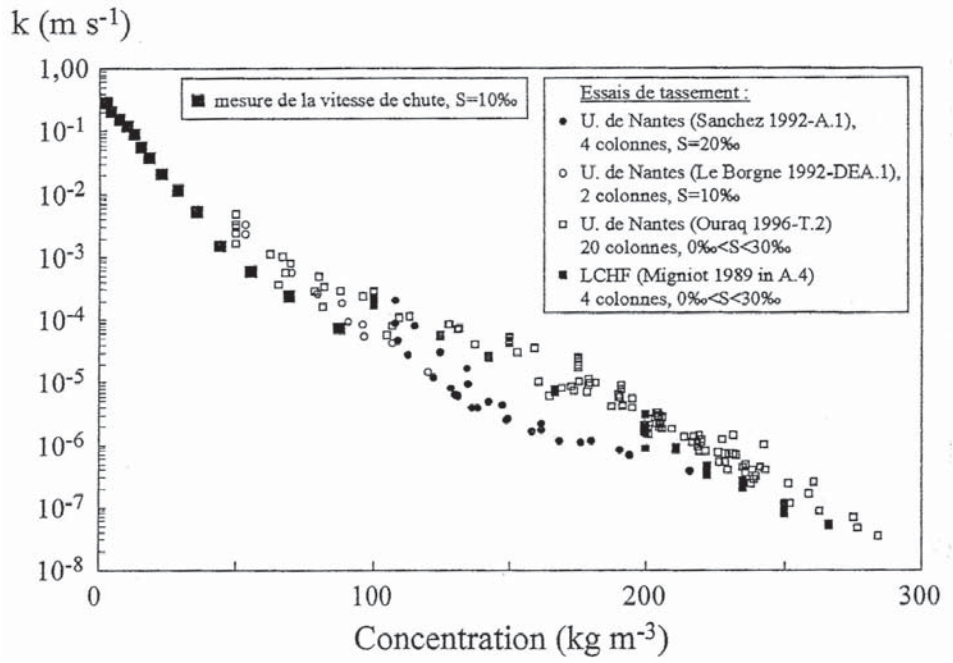


Figure 3 - Variation du coefficient de perméabilité en fonction de la concentration C pour des vases de l'estuaire de la Loire et pour différentes salinités S.

La validité de cette approche a été vérifiée par la reproduction de plus de 30 courbes de tassement des vases étudiées au Laboratoire Centrale d'Hydraulique de France (Migniot 1989 *in* A.2) avec des coefficients de corrélation de l'ordre de 0,98. Ces résultats sont présentés dans les références C.1 et A.3.

Au cours de ma thèse de doctorat, j'ai mis au point un modèle de tassement de vases adapté aux simulations hydrosédimentaires qui est basé sur les équations 6 et 7 ci-dessus et qui est présenté dans la référence A.2 (modèle "iso-concentration").

Selon ce modèle, la vitesse de tassement en surface d'une couche de vase en début du processus de tassement dépend seulement de la concentration initiale de cette couche. A titre d'exemple pour une concentration initiale de 110 kg m^{-3}, on a V_s=-3,3x10^{-6} m s^{-1}, et pour une concentration initiale de 420 kg m^{-3}, V_s=-7,9x10^{-12} m s^{-1}.

Selon ce même modèle toujours, à l'intérieur d'une couche de vase en cours de tassement le débit solide net $Q_{s/C}$ dépassant une concentration fixe C (par unité de surface horizontale) est donné par :

$$Q_{s/C} = \frac{k}{\rho_s}\left[\frac{\rho_s}{\rho_o} - 1\right] C^2 \left[A_2 \frac{C}{\rho_s} - 1\right] \qquad (8)$$

où A_1 et A_2 sont les paramètres de la loi exponentielle de variation de k (équation 7). Ainsi, pour la vase de Loire, le taux de transformation dépassant une concentration de 300 kg m^{-3}, est : $Q_{s/C}$=5x10^{-6} kg m^{-2} s^{-1}. Ce taux s'applique pour évaluer la transformation de crème de vase en dépôt de vase au cours du tassement, si l'on accepte que la concentration limite délimitant ces deux formations est C_{FF}=300 kg m^{-3} (cette valeur qui est un peu arbitraire correspond approximativement à la limite décelée à l'aide des sondeurs à ultrasons émettant dans deux bandes de fréquence).

Le modèle de tassement que j'ai développé s'applique également pour simuler la chute des vases en suspension à partir des concentrations de l'ordre de 1 kg m^{-3}. Cette approche permet de reproduire correctement, par l'équation 6, la courbe de variation de la vitesse de chute en fonction de la concentration présentée à la figure 1. Dans ce cas, le coefficient de perméabilité, appelé aussi conductivité hydraulique, ne peut pas être déterminé directement par l'équation 7 ajustée à partir des courbes de tassement, mais nécessite un ajustement dans le domaine des concentrations étudié. Néanmoins, quand on trace k en fonction de C on constate que la loi reliant ces deux paramètres est continue (voir figure 3).

APPLICATIONS DE LA MODÉLISATION DES PHÉNOMÈNES

Au cours de mes travaux en collaboration avec d'autres chercheurs, le modèle de tassement de vases molles a été souvent appliqué et a permis d'interpréter l'influence d'un certain nombre de paramètres sur les courbes de tassement.

Influence de la salinité sur le tassement

Ce modèle a permis à Ouraq (1976-T.2) d'étudier l'influence de la salinité sur le tassement des vases. En effet, la variation dans la salinité se traduit par une modification des courbes de tassement, et l'on pourrait ainsi penser que le coefficient de perméabilité est sensible à ce phénomène. En fait, des expériences en laboratoire montrent que les courbes de

tassement des vases de Loire ne sont sensibles à la salinité que lors de la phase initiale du processus.

L'influence de la salinité peut être mesurée grâce à un facteur temps T_o caractéristique de la durée de la phase initiale du processus, dont la valeur correspond au décalage de l'origine du temps des courbes de tassement effectué en accord avec la figure 1 de la référence B.2. Pendant la phase initiale du tassement, la concentration en surface est constante et égale à la concentration initiale C_i et la vitesse de tassement associée à C_i peut être modélisée par l'équation ci-dessous, laquelle s'accorde assez bien avec les observations (Ouraq 1996-T.2) :

$$V_{sf} = V_s(C_i)\left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_o}\right)\right] \qquad (9)$$

où V_{sf} est la vitesse de tassement de la vase en surface au cours de la phase initiale du processus de tassement, phase dite de floculation, $V_s(C_i)$ la vitesse de tassement associée à C_i selon l'équation 6 et t le temps.

Le tableau I.1 donne des valeurs de T_o en fonction de la salinité de l'eau et de la concentration initiale. On constate que la salinité fait diminuer le temps de floculation, si bien que le tassement au début du processus est d'autant plus rapide que la concentration est plus importante. L'influence de la salinité est très nette pour les mixtures d'une concentration initiale de 100 kg m^{-3} et diminue progressivement avec l'augmentation de la concentration initiale. De plus l'influence de la concentration n'est pas visible pour C_i=50 kg m^{-3}.

Salinité (‰)	C_i=50 kg m^{-3}	C_i=100 kg m^{-3}	C_i=150 kg m^{-3}	C_i=175 kg m^{-3}
0	0 s	8000 s	4510 s	4150 s
5	0 s	4300 s	2680 s	1320 s
10	0 s	3380 s	2060 s	600 s
20	0 s	3080 s	1460 s	0 s
30	0 s	1850 s	1000 s	0 s

Tableau I.1 - Facteur temps T_o caractéristique de la durée de la phase de floculation.

Des résultats tout à fait semblables sont obtenus par l'interprétation des courbes de tassement de Migniot (1989 *in* A.2) des vases de Loire à salinité différente (Sanchez 1992-C.1, pages 16 et 17). En effet, on constate que le coefficient de perméabilité n'est pas affecté par la salinité mais celle-ci influence la vitesse de tassement au début du processus.

Modélisation du tassement des vases non saturées

Le modèle de tassement a été modifié et validé expérimentalement par Ouraq (1996-T.2; 1996-B.10) afin de simuler le tassement des vases non saturées. Les travaux de thèse de Ouraq montrent que la décomposition de la matière organique liée à une activité bactérienne peut entraîner l'apparition d'une phase gazeuse dans la structure des vases fraîchement déposées, engendrant un ralentissement très important du tassement.

Formation de la crème de vase

On observe dans certains cours d'eau la présence au fond d'une suspension fluide très concentrée appelée couramment crème de vase. Cette formation est située principalement dans les zones où la teneur en MES est très élevée, comme dans les estuaires.

Usuellement, la crème de vase est détectée sur les fonds en utilisant un sondeur bathymétrique. Le sondeur émet des ultrasons dans deux bandes de fréquence centrées sur 33 et sur 210 kHz. Les hautes fréquences se réfléchissent sur le toit de la crème de vase alors que les basses fréquences traversent la crème de vase et se réfléchissent sur la vase consolidée sous-jacente d'une certaine concentration C_{FF} (concentration du fond fixe). Pour la vase de l'estuaire de la Loire le domaine de concentrations de la crème de vase va de 50 à 300 kg m^{-3}. On peut estimer alors que C_{FF}=300 kg m^{-3}.

Selon le modèle de tassement présenté préalablement on peut déterminer les conditions de formation de la crème de vase (figure 4). En effet, la formation de la crème de vase résulte d'un taux de dépôt des matières en suspension Q_D élevé par rapport à $Q_{s/C_{FF}}$. Pour la vase de la Loire, cette condition s'écrit comme suit : $Q_D > 5x10^{-6}$ kg m^{-2} s^{-1}.

Lorsque cette inégalité n'est plus satisfaite, le passage de matières de vase en suspension à un fond peu mobile se fait directement sans passer par un état physique de crème de vase. Ce cas de faible taux de dépôt se présente principalement dans les zones où la turbidité est faible (figure 4).

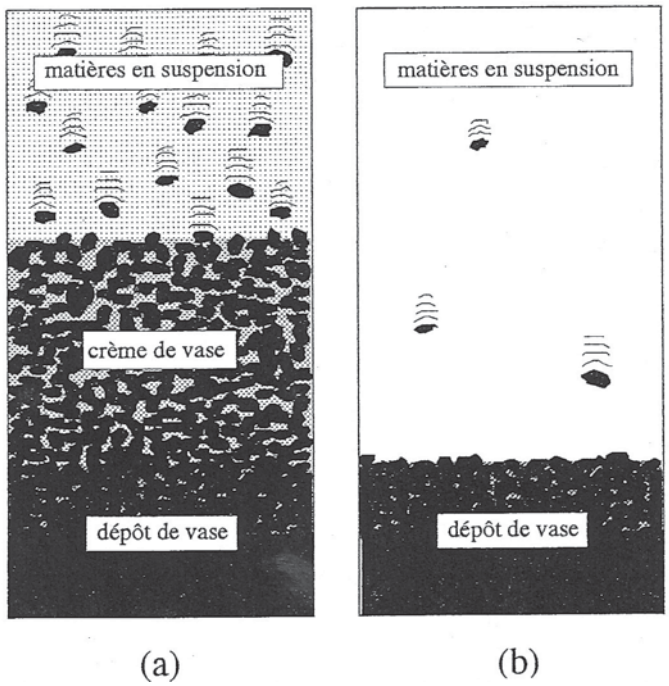


Figure 4 - Transfert des vases en suspension vers le fond (Sanchez et Grovel 1994-A.4).
(a) Taux de sédimentation élevé : formation de la crème de vase.
(b) Taux de sédimentation faible : transfert direct vers le dépôt.

D'autres applications du modèle de tassement, combiné avec d'autres modèles et tenant compte des observations de la dynamique sédimentaire, sont présentées au chapitre suivant.

PROCESSUS D'ÉROSION DES VASES

Dans les modèles actuels d'érosion de sédiments par un écoulement turbulent, l'action du courant est caractérisée par la tension de cisaillement au fond τ_o. Néanmoins, la force réelle exercée par le courant par unité de surface de sédiment n'est pas exactement égale à τ_o, mais seulement proportionnelle à cette grandeur. La force réelle à un moment donné dépend entre autres de la rugosité locale du fond, des fluctuations turbulentes des vitesses et probablement des variations de la pression interstitielle. Il est cependant admis que τ_o est la grandeur qui caractérise le mieux la "force du courant".

Pour établir une loi universelle de début d'érosion des vases, on doit traiter ce problème d'une manière théorique ; pour ce faire on a besoin de connaître une grandeur caractérisant le mieux possible la résistance des sédiments. C'est ainsi qu'en utilisant la cohésion effective c' pour caractériser cette résistance, Partheniades (1965 *in* A.6) aboutit à la loi suivante :

$$\tau_{oc} = k\, c' \qquad (10)$$

où τ_{oc} est la valeur de τ_o critique d'érosion et k un coefficient de proportionnalité adimensionnel. Cette relation est en accord avec le critère de rupture de Coulomb utilisé en mécanique des sols, mais malheureusement Partheniades ne fournit pas de renseignements concernant la valeur du coefficient k.

Le début d'érosion a été étudié d'une façon très approfondie par Migniot (1989 *in* A.6). Dans ces études Migniot caractérise l'action de l'écoulement par la vitesse de cisaillement u_*, définie par : $u_*=(\tau_o/\rho_o)^{0,5}$. En étudiant en laboratoire plus de 30 matériaux cohésifs d'origines diverses, Migniot établit les formules universelles suivantes :

$u_{*c} = 0{,}013\ \tau_y^{0,25}$, pour : $\tau_y < 3$ Pa (vases fluides) (11a)

$u_{*c} = 0{,}009\ \tau_y^{0,50}$, pour : $\tau_y > 3$ Pa (vases plastiques) (11b)

où u_{*c} est la vitesse de cisaillement critique d'érosion [m s^{-1}], et τ_y est la rigidité initiale du sédiment [Pa], qui est mesurée à l'aide d'un viscosimètre "Brookfield LVT", en suivant un protocole d'essai bien défini (Migniot 1989 *in* A.6). La loi de début d'érosion des vases plastiques proposée par Migniot peut être mise sous la forme suivante :

$$\tau_{oc} = 0{,}081\ \tau_y \qquad (12)$$

Cette loi est donc semblable à celle de Partheniades, car les grandeurs c' et τ_y sont analogues et ne diffèrent entre elles que par le modèle rhéologique utilisé pour représenter le comportement des sédiments. De plus, cette équation est dimensionnellement homogène.

Il est important de signaler que les lois proposées pour le début d'érosion dépendent de la méthodologie et des instruments utilisés pour caractériser le comportement mécanique des sédiments et du critère retenu pour définir le début de l'érosion. On doit ainsi indiquer que pour Migniot, le début d'érosion correspond à une érosion généralisée. Plus précisément les critères d'érosion qu'il utilise sont les suivants :

- pour les vases fluides, le début d'érosion correspond à l'apparition d'un entraînement par le courant d'une "fumée" de vase,
- pour les vases plastiques, la condition critique d'érosion correspond à un arrachement de vase sous forme de copeaux, observé sur toute la surface du dépôt,
- enfin, pour les vases très rigides, le début d'érosion correspond à un arrachement de galets de vase qui roulent sur le fond, entraînés par le courant.

Les études de Migniot et de Partheniades montrent l'importance jouée par le comportement rhéologique des vases dans l'étude du processus d'érosion. Or, à température et concentration constantes, ce comportement, est très variable d'une vase à une autre selon leurs composantes : minéraux argileux, matière organique, débris d'organismes, oxydes divers, métaux, eau interstitielle, ... Ainsi, à concentration constante, la rigidité initiale d'une vase est d'autant plus élevée que la fraction argileuse est fine ou que la matière organique est oxydée ; la salinité de l'eau interstitielle est ici un paramètre secondaire (Migniot 1989 *in* A.6). Par ailleurs, la rigidité diminue lorsque la vase est remaniée à cause du phénomène de thixotropie, mais cette rigidité est récupérée après un temps de repos de quelques minutes.

Pour un sédiment donné comme la vase de Loire, les études de Migniot (1989 *in* A.6) montrent que le comportement dépend principalement de la concentration en matières sèches, de sorte que τ_y est proportionnelle à la cinquième ou sixième puissance de la concentration C dans les vases plastiques.

Les mécanismes de l'érosion observés en laboratoire sont très différents selon le comportement mécanique des dépôts de vase.

Pour les sédiments peu concentrés (vases fluides), l'érosion se produit par bouffées, on voit d'abord apparaître une ondulation à l'interface, puis celle-ci s'amplifie, déformant de plus en plus la couche de sédiments ; ceux-ci sont finalement entraînés sous forme de filets de vase, puis dilués dans l'eau du courant superficiel (Périgaud 1983 *in* A.6).

Pour les sédiments concentrés (vases plastiques), l'érosion se produit par l'arrachement de petits copeaux de matériau (Périgaud 1983 *in* A.6). Ces copeaux de matériau se diluent très difficilement dans les eaux et sont transportés en forme de galets de faible masse volumique mais de forte cohésion. Dans la plupart des cas, l'érosion prend naissance à partir d'un point préférentiel (particules de sable, puits de drainage, etc.).

D'après Migniot (1989 *in* A.6), pour des vases très concentrées ayant atteint une rigidité supérieure à 75 Pa, les dépôts se comportent comme un solide résistant à de très fortes vitesses. Si l'on atteint le seuil critique d'érosion les dépôts ne sont plus remis en suspension mais sont arrachés sous forme de copeaux ou de blocs qui sont transportés par charriage et donnent naissance à des galets de vase que l'on rencontre dans les torrents.

RHÉOLOGIE DES VASES

Au cours de ma thèse de doctorat j'ai étudié l'influence de la température sur le seuil de plasticité et sur la viscosité apparente d'une vase de Loire de concentration C=304,8 kg m^{-3}. L'appareil utilisé est un rhéomètre à cylindres coaxiaux avec le cylindre extérieur stationnaire (rhéomètre "Rheomat 108") qui fonctionne à vitesse de rotation constante.

Les mesures ont été réalisées en suivant un mode opératoire selon lequel le matériau est mis en place dans le récipient du rhéomètre et est laissé au repos pendant 10 minutes afin qu'il récupère sa résistance initiale. Ensuite, le balayage de toute la plage des vitesses est effectué avec un palier d'une minute pour chaque gradient de vitesse (les gradients de vitesses du/dz sont : 64,9 ; 99,1 ; 152 ; 233 ; 358 ; 549 ; 842 et 1290 s^{-1}). Le balayage de la plage des vitesses est fait dans les deux sens, d'abord en sens ascendant, puis en sens descendant.

Le seuil de plasticité est déterminé par extrapolation en utilisant le modèle de Bingham. Des mesures réalisées à des températures de 12° C, 18° C, 21° C, 27° C, 31° C et 36° C, (figure 5) ont montré que les valeurs du seuil de plasticité de Bingham et celles de la viscosité apparente, augmentent lorsque la température diminue, suivant une loi de variation avec la température très semblable à celle de la viscosité dynamique de l'eau.

Pour une vase donnée à concentration constante, le seuil de plasticité de Bingham et la viscosité apparente sont donc donnés par :

$$\tau_{B\theta} = \tau_{B\theta_o} \frac{\mu_{eau\,\theta}}{\mu_{eau\,\theta_o}} \qquad \text{, et :} \qquad \eta_\theta = \eta_{\theta_o} \frac{\mu_{eau\,\theta}}{\mu_{eau\,\theta_o}} \tag{13}$$

où τ_B est le seuil de plasticité de Bingham [Pa], η la viscosité apparente [Pa s], μ_{eau} la viscosité dynamique de l'eau [Pa s], l'indice θ désigne une température quelconque [° C] et l'indice θ_o désigne une température de référence arbitraire fixée à 18° C.

Ces lois sont valables au moins pour les conditions expérimentales des essais, soit pour des températures comprises entre 12 et 36° C et pour une vase de Loire de concentration C=304,8 kg m^{-3}. Cependant, il est raisonnable d'envisager que ces lois s'appliquent à toutes les vases molles de Loire dont la concentration est inférieure à celle indiquée ci-dessus.

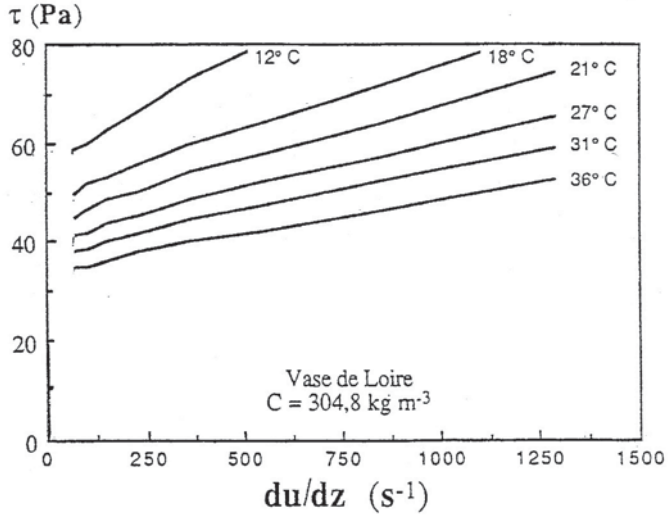


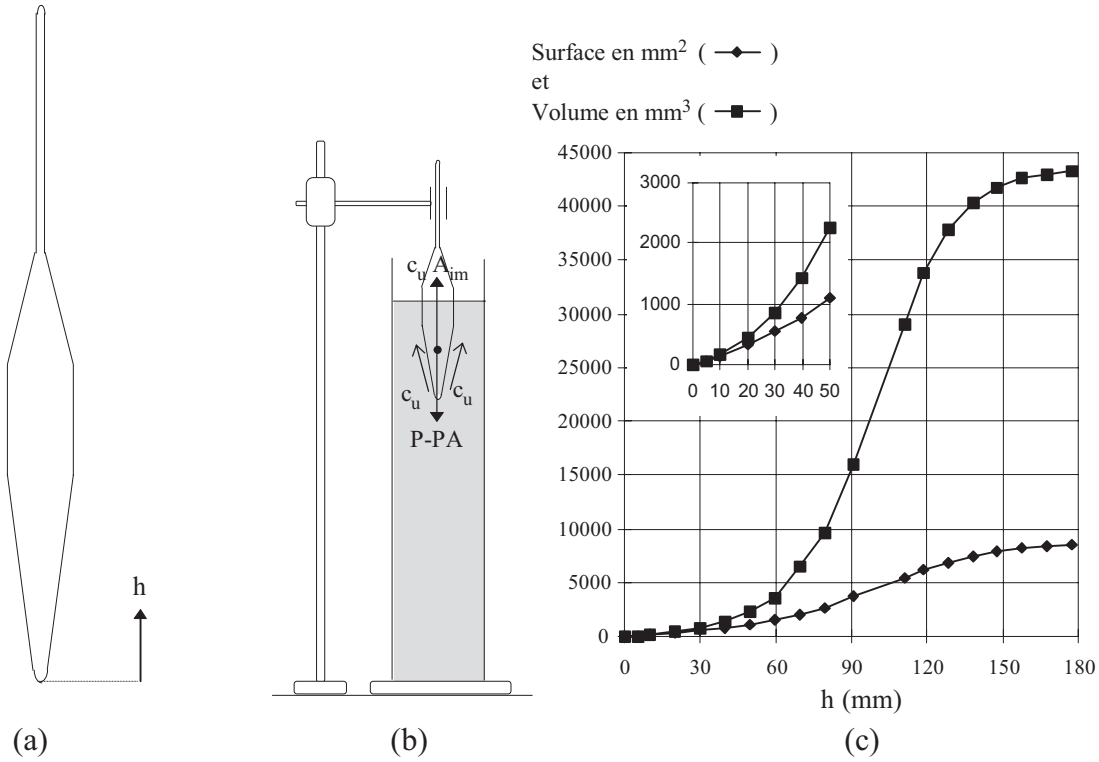
Figure 5 - Rhéogrammes d'une vase de Loire pour différentes températures [A.1].

Dans le cadre du DEA de Hosseini (1995-DEA.9), 3 démarches différentes pour caractériser le comportement mécanique des vases molles ont été étudiées : la mesure de la rigidité initiale avec un rhéomètre à cylindres (rhéomètre "Brookfield LVT"), la mesure de la cohésion non drainée à l'aide d'un densimètre du type torpille, et l'évaluation de la rigidité de la vase par la mesure de la pente au-dessus de laquelle un échantillon de vase de 2 mm d'épaisseur s'écoule. Cette étude a montré que des résultats fiables et répétitifs peuvent être obtenus par les deux premières méthodes décrites ci-dessus (Hosseini *et al.* 1996-B.11).

Les mesures de la cohésion non drainée ont été réalisées grâce à une méthode que nous avons mise au point. L'immersion d'un densimètre du type torpille dans une mixture de vase jusqu'à l'équilibre des forces permet de déterminer la cohésion non drainée c_u de ce matériau par la formule suivante (voir figure 6) :

$$c_u = \frac{P - \rho g V_{im}}{A_{im}} \qquad (14)$$

où P est le poids du densimètre [N], ρ la masse volumique de la vase [kg m^{-3}], V_{im} le volume immergé du densimètre [m^3], et A_{im} la surface immergée du densimètre en contact avec la vase [m^2]. La gamme de mesures possibles avec ce densimètre est : 0,5 N m^{-2}<c_u<500 N m^{-2}.



(a) (b) (c)

Figure 6 - Schémas illustrant la mesure de la cohésion non drainée à l'aide d'un densimètre. a) Schéma du densimètre. b) Forces en équilibre. c) Caractéristiques du densimètre.

Une série de tests préliminaires de mesure de la rigidité initiale d'une vase à l'aide du rhéomètre, en respectant toujours le même protocole, ont montré que la grandeur mesurée pouvait varier du simple au double entre deux tests successifs réalisés sur une même vase.

Pour cette raison, dans les études où je participe, la rigidité initiale est examinée statistiquement à partir d'une série de 15 mesures. Ce nombre de mesures permet d'obtenir des résultats stables et répétitifs pour la moyenne et pour l'écart type de la rigidité initiale. Autrement, si une seule mesure est réalisée pour déterminer la rigidité initiale d'une vase donnée, la probabilité que la valeur obtenue diffère de la moyenne de plus d'une fois l'écart-type est d'environ 32 %.

Les mesures de c_u sont en général plus répétitives que celles de τ_y si bien qu'une séquence de 10 mesures est suffisante pour évaluer correctement sa moyenne et son écart type.

Les tableaux I.2 et I.3 montrent, respectivement, les résultats des mesures de la rigidité initiale et de la cohésion non drainée, correspondant aux vases de Loire étudiées par Hosseini (1999-T.3) dans son travail de thèse.

			Concentration moyenne						
			100 kg m^{-3}	150 kg m^{-3}	210 kg m^{-3}	260 kg m^{-3}	310 kg m^{-3}	390 kg m^{-3}	420 kg m^{-3}
τ_y (N m^{-2})	essai n° 1	moyenne	0,72	1,19	5,29	19,20	55,0	126,0	141,0
		écart-type	0,10	0,18	0,84	4,46	16,2	25,7	29,0
	essai n° 2	moyenne	0,73	1,13	5,25	19,10	53,0		
		écart-type	0,11	0,16	0,94	5,06	15,8		
	essai n° 3	moyenne	0,73	1,22	5,25	22,70	57,0		
		écart-type	0,11	0,15	0,76	5,47	18,0		
	moyennes de la série	moyenne	0,73	1,18	5,26	20,30	55,0	126,0	141,0
		écart-type	0,11	0,17	0,87	5,00	16,7	25,7	29,0
		$\frac{\text{écart - type}}{\text{moyenne}}$	15%	14%	17%	25%	30%	20%	21%
Rotors utilisés :			n° IV	n° IV	n° III	n° II	n° I	n° I*	n° I*

(* pour les concentrations de 390 et 420 kg m^{-3}, le rotor n° I est utilisé partiellement immergé, pour éviter que la lecture ne dépasse la graduation maximale du cadran).

Tableau I.2 - Valeurs de la rigidité initiale et de son écart-type évaluées par l'analyse d'une séquence de 15 mesures consécutives réalisées sur des vases de Loire à concentrations fixes (d'après Hosseini 1999-T.3).

			Concentration moyenne						
			100 kg m^{-3}	150 kg m^{-3}	210 kg m^{-3}	260 kg m^{-3}	310 kg m^{-3}	390 kg m^{-3}	420 kg m^{-3}
c_u (N m^{-2})	essai n° 1	moyenne	0,74	1,22	6,54	41,10	105,0	313,0	381,0
		écart-type	0,15	0,24	0,46	1,10	6,0	5,0	9,4
	essai n° 2	moyenne	0,75	1,28	6,95	40,40	99,0		392,0
		écart-type	0,17	0,22	0,71	0,87	3,4		13,2
	essai n° 3	moyenne	0,74	1,13	5,95	40,60	99,0		
		écart-type	0,16	0,19	0,50	1,34	2,2		
	moyennes de la série	moyenne	0,74	1,21	6,48	40,70	101,0	313,0	387,0
		écart-type	0,16	0,22	0,56	1,10	3,9	5,0	11,3
		$\frac{\text{écart - type}}{\text{moyenne}}$	22%	18%	9%	3%	4%	1,6%	3%

Tableau I.3 - Valeurs de la cohésion non drainée et de son écart-type évaluées par l'analyse d'une séquence de 10 mesures réalisées sur des vases de Loire à concentrations fixes (d'après Hosseini 1999-T.3).

Pour les faibles concentrations inférieures à 210 kg m^{-3}, les valeurs obtenues pour la cohésion non drainée sont très proches de celles de la rigidité initiale, mais pour les plus grandes concentrations, les valeurs moyennes de c_u sont environ 2,5 fois plus grandes que celle de τ_y. Cette différence est proche de celle observée par Hosseini (1995-DEA.9) sur une autre vase de Loire, ainsi que de celle observée systématiquement par Migniot (1989 *in* A.6) qui a mesuré c_u à l'aide d'un scissomètre à croisillons métalliques et qui trouve que les valeurs de c_u sont environ 3 fois supérieures à celles de la rigidité initiale mesurée au rhéomètre "Brookfield LVT".

La figure 7 montre la rigidité initiale mesurée au rhéomètre "Brookfield LVT" lors de 3 études différentes sur des échantillons prélevés à des dates et dans des sites différents de l'estuaire de la Loire (Migniot 1989 *in* A.6, Hosseini *et al.*1996-B.11, Hosseini 1999-T.3). On constate que si l'on ajuste une loi sur les mesures de chaque étude on peut obtenir des courbes de régression touchant l'ensemble des points expérimentaux. En revanche, l'existence d'une loi unique de τ_y en fonction de C valable pour toutes les vases de Loire ne peut avoir de validité que d'un point de vue statistique.

Seule l'étude de la rigidité initiale en fonction de la concentration sur un nombre beaucoup plus important d'échantillons prélevés tout le long de l'estuaire et à des dates différentes, pourrait permettre d'ajuster une loi de tendance entre τ_y et C valable pour l'ensemble des vases de l'estuaire de la Loire, avec une certaine dispersion caractérisée par l'écart-type.

En fait, l'existence d'une loi entre τ_y et C valable en moyenne pour toutes les vases de Loire peut être effectivement envisagée, car cette vase a une composition assez homogène dans l'espace et dans le temps (Roger 1988 *in* T.3).

Cette homogénéité est confirmée par les travaux de Migniot (1989 *in* A.6), de Sanchez et Grovel (1994-A.4) et de Ouraq (1996-T.2), qui montrent que le coefficient de perméabilité des vases de cet estuaire, qui caractérise un comportement hydraulique, obéit globalement à une loi unique en fonction de la concentration (voir figure 3), avec, bien entendu, des écarts plus ou moins importants selon le site et la date de prélèvement d'un échantillon. Mais ces écarts sont en général peu importants par rapport aux écarts qui peuvent être observés entre deux vases de deux estuaires différents.

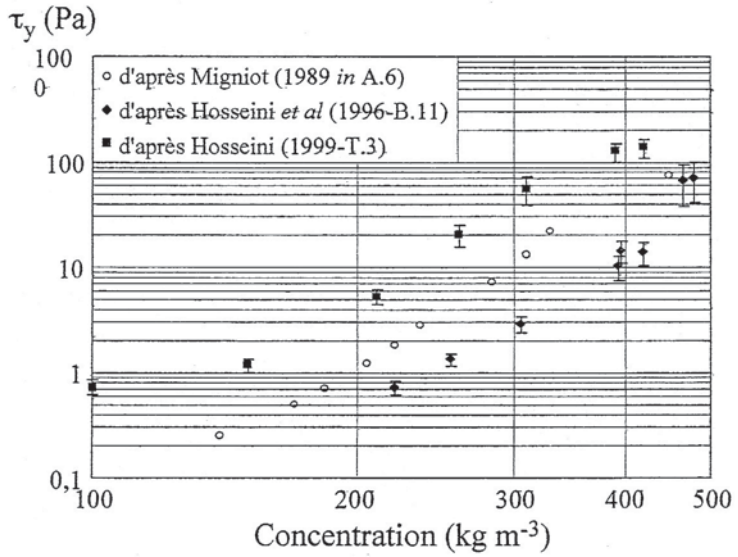


Figure 7 - Variation de la rigidité initiale mesurée au rhéomètre "Brookfield LVT" en fonction de la concentration, pour la vase de Loire.

TAUX D'ÉROSION DES VASES

En collaboration avec Hosseini (1999-T.3) un système hydraulique a été conçu pour étudier l'érosion des vases. Il s'agit d'un circuit fermé où la circulation d'eau est assurée par une pompe centrifuge.

Le système, qui est schématisé sur la figure 8, comporte 1 pompe, 1 veine d'essais de section rectangulaire, 1 débitmètre, 2 vannes, 1 réservoir de régulation, 2 transitions section circulaire-rectangulaire, et des conduites à section circulaire en PVC ($\phi_{intérieur}$=0,083 m) assurant les liaisons entre les différents éléments du système.

Les dimensions de la veine d'essais sont : 0,12 m de largeur, 0,05 m de hauteur et 2 m de longueur. Un bac à sédiments est situé au milieu de la veine d'essais où l'écoulement est le plus uniforme. Les dimensions de ce bac sont : 1 m de longueur, 0,05 m de profondeur, et, afin d'éviter les phénomènes de bord, on a limité la largeur à 0,08 m.

En aval du bac à sédiments on a mis en place un piège à sédiments permettant d'attraper les copeaux de vase lorsque l'érosion se produit par arrachement de ceux-ci, et ainsi pouvoir mesurer leur taille et leur densité.

Ce système a été validé par l'étude des conditions critiques de mise en mouvement de sables en vérifiant que les résultats obtenus sont en accord avec les courbes de Shields et de Bonnefille (Hosseini 1999-T.3).

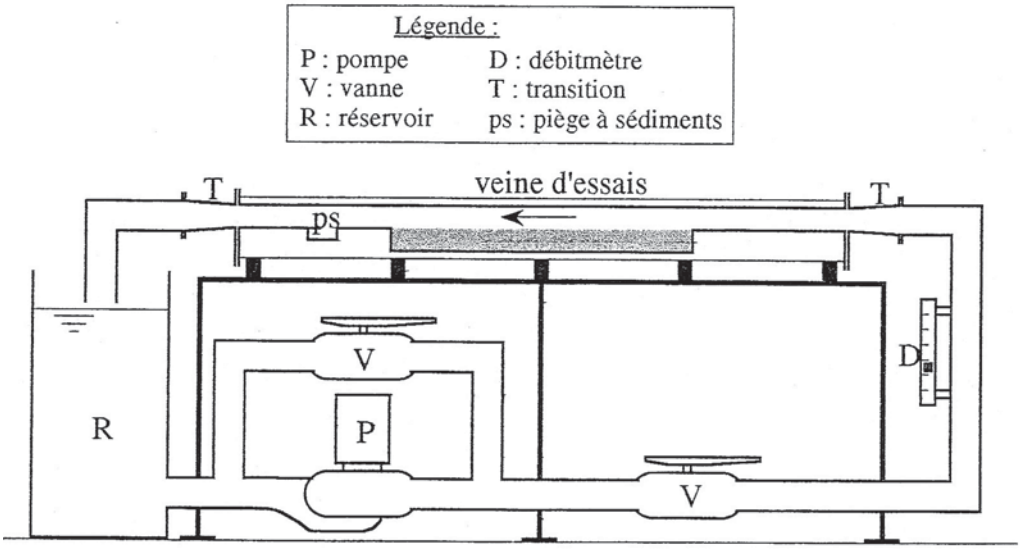


Figure 8 - Schéma du système expérimental utilisé pour réaliser les essais d'érosion en laboratoire.

Cette étude a permis d'ajuster une loi pour le taux volumique d'érosion E_v affectant la vase de Loire en fonction de τ_o. La loi qui s'ajuste au mieux avec les points expérimentaux, est une loi analogue à celle proposée par Mehta et Partheniades (1982 *in* A.6). La loi retenue pour E_v s'écrit :

$$E_v = E_{vo} \exp\left[\alpha_v \frac{\tau_o - \tau_{oc}}{\tau_{oc}} \right] \qquad (15)$$

où E_{vo} et α_v sont les coefficients de la loi d'érosion et τ_{oc} est la tension de cisaillement critique d'érosion. Selon cette loi, pour τ_o=τ_{oc}, on a un taux d'érosion résiduel non nul égal à E_{vo} qui est fixé arbitrairement. Dans cette étude on fixe E_{vo}=3x10^{-7} m s^{-1}, valeur qui correspond à une érosion résiduelle d'une couche de 1 mm en une heure, ce qui représente une érosion relativement faible.

Les paramètres de la loi d'érosion présentée ci-dessus ont été rattachés à la rigidité initiale, à la masse volumique de la vase ρ et à la rugosité hydraulique de celle-ci, laquelle a été évaluée à partir des mesures des vitesses et des pertes de charge réalisées lors des essais. Les paramètres de la loi d'érosion sont donnés par :

$$\tau_{oc} = 0{,}294\,\tau_y \left(\frac{\rho - \rho_o}{\rho_o}\right)^{1{,}11} \quad , \quad \alpha_v = 0{,}1145 \frac{\sqrt{\tau_{oc} / \rho_o}\ \in}{\nu} \quad , \quad E_{vo} = 3\text{x}10^{-7}\ \text{m s}^{-1} \qquad (16)$$

avec : ∈=0,00087 m, pour l'ensemble des essais.

L'ajustement a été réalisé par une méthode des moindres carrés non linéaire qui permet de minimiser la somme des écarts quadratiques S_{ln} entre les logarithmes des taux volumiques d'érosion E_{vc} calculés avec l'équation 15, et les logarithmes des taux volumiques d'érosion mesurés E_{vm}. La somme de ces écarts quadratiques est définie par :

$$S_{ln} = \sum_{i=1}^{n} \left(\ln(E_{vci}) - \ln(E_{vmi})\right)^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(\ln\left(\frac{E_{vci}}{E_{vmi}}\right)\right)^2 \qquad (17)$$

où l'indice i désigne une grandeur qui correspond à la i^{ème} mesure du taux volumique d'érosion et n est le nombre total de mesures.

L'écart quadratique S_{ln} caractérisant l'écart entre les taux volumiques d'érosion calculés et mesurés est égal à 1,52. Cet écart permet d'avancer que le taux volumique d'érosion calculé peut différer de E_v mesuré, tout au plus d'un facteur d'environ ±3,4 dans 68% des cas.

Les écarts observés entre deux tests d'érosion successifs sur une même vase sont donc très importants. Il semble que la nature du phénomène d'érosion ne permet pas d'obtenir des résultats répétitifs. En effet, le taux d'érosion observé pour des valeurs fixes de C et de τ_o, dépend en grande partie des rugosités et des fissures créées préalablement lors du test.

La figure 9 montre les taux volumiques d'érosion de la vase de Loire en fonction de τ_o mesurés dans 17 tests d'érosion correspondant à 7 concentrations différentes étudiées en laboratoire. On montre aussi les courbes ajustées en fonction de τ_y et de ρ correspondant à chacune des concentrations étudiées.

On constate que les valeurs de τ_{oc} obtenues avec la loi de Migniot (équations 11) peuvent se situer approximativement avec leur famille correspondante de la figure 9, sur l'abscisse définissant un taux volumique d'érosion E_v=8x10^{-6} m s^{-1}. Cette valeur de E_v correspond à l'érosion d'une couche d'environ 30 mm d'épaisseur en une heure, ce qui représente une érosion relativement importante. La loi de début d'érosion de Migniot est donc valable pour les essais d'érosion sur la vase de Loire réalisés au cours de cette étude si l'on retient comme critère de début d'érosion celui d'une érosion généralisée sur toute la surface de la vase.

La loi du taux volumique d'érosion ajustée pour la vase de Loire s'applique pour une vase de Seine étudiée par Ballay (1998-DEA.15) à la valeur près de la constante d'érosion résiduelle qui prend une valeur dix fois plus faible, soit E_{vo}=3x10^{-8} m s^{-1}. Ce rapport 1 à 10 de E_{vo} est probablement liée au fait que τ_y est un paramètre qui ne caractérise pas parfaitement la résistance d'une vase à l'action hydrodynamique d'un courant.

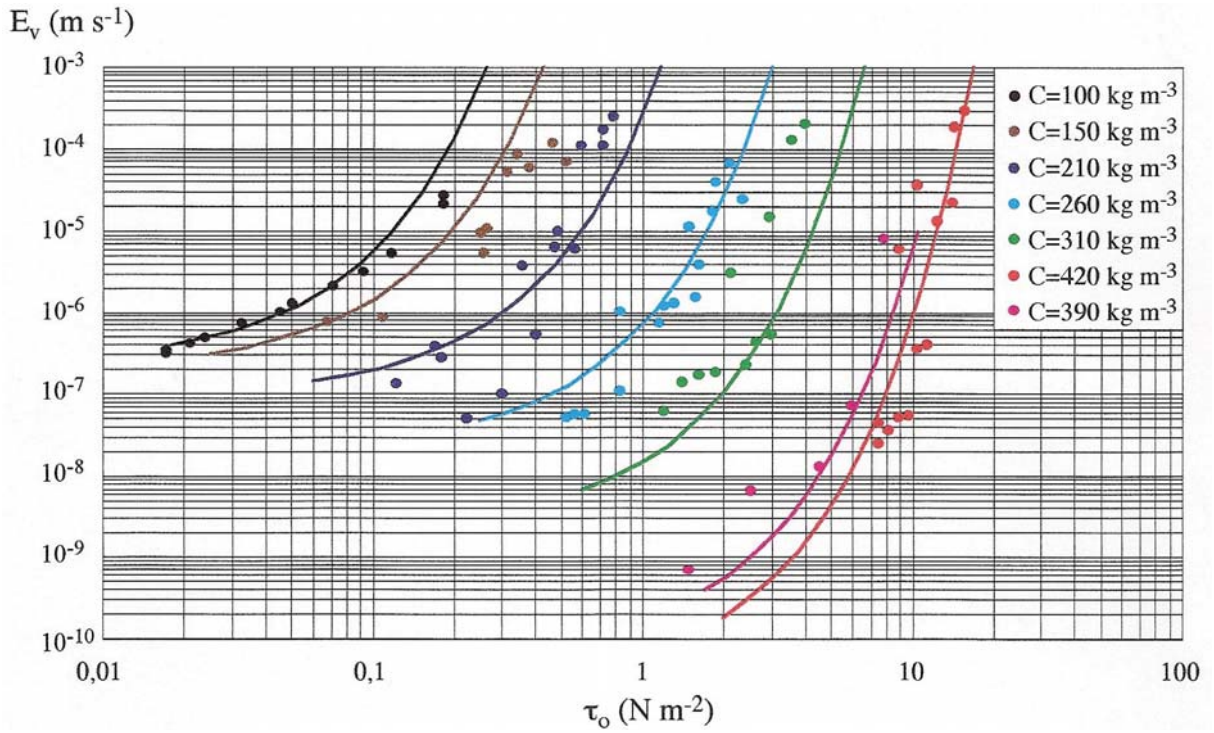


Figure 9 - Taux volumique d'érosion en fonction de la tension de cisaillement au fond pour les vases de Loire étudiées en laboratoire, et courbes correspondant à l'ajustement des paramètres de la loi du taux d'érosion en fonction de la rigidité initiale τ_y et de ρ (d'après Hosseini 1999-T.3).

De même que les lois de variation de k et de τ_y en fonction de la concentration ne sont valables que d'un point du vue statistique, la loi de E_v a aussi une signification purement statistique.

La loi de E_v ajustée pour la vase de Loire est en accord avec des observations in situ montrant l'érosion de toute la crème de vase pour des coefficients de marée supérieurs à 75.

Les tests d'érosion ont montré que les vases de Loire consolidées de concentration de l'ordre de 400 kg m^{-3} ne peuvent être érodées par les courants extrêmes qui se présentent dans l'estuaire de la Loire qu'avec des taux d'érosion très faibles, car ceux-ci sont accompagnés d'une tension de cisaillement au fond maximale de l'ordre de 4 Pa. Pour cette raison, un essai d'érosion de longue durée a été réalisé sur une vase de concentration 390 kg m^{-3}, afin de vérifier si des érosions pouvait être mesurées à long terme.

L'essai s'est étalé sur cinq jours consécutifs avec des arrêts nocturnes de l'ordre de 12 heures. La figure 10 montre l'évolution de la teneur en matières en suspension MES, en fonction du temps cumulé de l'essai. Au cours de cet essai on réalise cinq paliers à vitesse constante dont les droites ajustées sont représentées sur la figure 10.

On constate qu'au cours d'un palier à vitesse constante, l'accroissement de la teneur en matières en suspension MES n'est pas strictement uniforme et on remarque notamment une augmentation importante de MES dans les minutes qui suivent la mise en marche de la pompe après un arrêt nocturne.

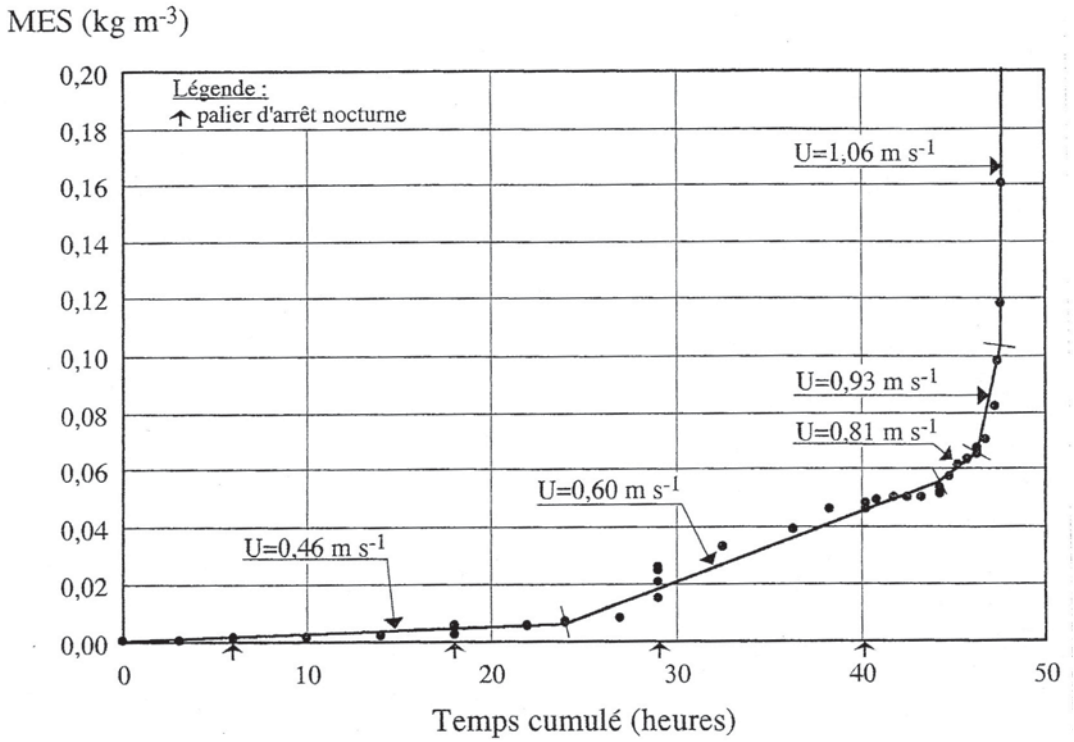


Figure 10 - Evolution de la teneur en matières en suspension en fonction du temps cumulé pour un essai d'érosion réalisé sur une vase de Loire de concentration C=390 kg m^{-3}.

Cette augmentation est provoquée par des vers de vase qui remuent le sédiment en creusant des canaux sur la surface du dépôt de vase la nuit, lorsque la vitesse de l'écoulement est nulle. On peut supposer que les vers de vase modifient quelque chose que l'on pourrait appeler une "rugosité caractéristique" de la surface des dépôts.

Malgré la contribution des vers de vase à l'érosion observée en laboratoire et malgré le fait qu'au cours d'un palier la variation de MES avec le temps n'est pas parfaitement régulière, on considère que les résultats issus de cet essai, sont représentatifs des faibles taux d'érosion des vases consolidées de Loire.

Lors de cette étude on a étudié aussi les agrégats issus de l'érosion des vases. On a constaté que ces agrégats en suspension résistent sans cassure à des contraintes hydrodynamiques importantes s'ils sont issus d'une vase dont la rigidité initiale est supérieure à 20 N m^{-2}. Des mesures de la masse volumique et de la taille de ces agrégats ont permis d'avancer les conclusions suivantes concernant les agrégats de vase que l'on observe dans l'estuaire de la Loire :

- les agrégats en suspension dans l'estuaire de la Loire qui sont observés en dehors des périodes d'eau calme sont issus vraisemblablement de l'érosion des vases "plastiques" (des rigidités initiales supérieures ou égales à 20 N m^{-2}),
- l'érosion des vases dont l'état physique est assimilable à la crème de vase (de rigidité initiale égale ou inférieure à 5,2 N m^{-2}), se produit sous la forme de filets de vase qui sont complètement dilués dans l'eau après leur remise en suspension,

- le diamètre final des agrégats issus de l'érosion des vases "plastiques" varie entre 1 et 2 mm, quelle que soit la rigidité initiale du dépôt, à condition que celle-ci soit supérieure ou égale à 20 N m^{-2} (en fait, la taille maximale des agrégats juste après l'érosion est d'autant plus grande que τ_y est grand ; néanmoins, si la taille des agrégats est supérieure à 2 mm, ceux-ci roulent sur le fond entraînés par l'écoulement et des cassures se produisent rapidement engendrant des agrégats presque sphériques d'un diamètre compris entre 1 mm et 2 mm),
- la concentration des agrégats issus de l'érosion des vases "plastiques" de Loire est voisine de celle des dépôts dont ils sont issus,
- la masse volumique de l'eau interstitielle d'un agrégat de vase est celle de l'eau environnante,
- la vitesse de chute en eau calme dans un estuaire, d'un agrégat de vase à structure stable est pratiquement indépendante des variations de la masse volumique de l'eau dans l'estuaire, car son poids volumique déjaugé varie très peu.

Ces conclusions ne veulent pas dire que la floculation est un phénomène secondaire, même s'il est peu probable que des agrégats stables puissent être formés par floculation dans un écoulement turbulent. En effet, lors des périodes d'eaux calmes, la floculation facilite en grande partie la chute des sédiments. Ceci est confirmé par des mesures en eau calme réalisées par Migniot (1989 *in* A.2) qui ont montré que la vitesse de chute des sédiments fins dans un milieu floculant varie entre 0,15 et 0,60 mm s^{-1}, quelle que soit la dimension des particules élémentaires, alors que la vitesse de chute de ces particules élémentaires défloculées est de l'ordre du micron par seconde.

SYNTHÈSE DES ÉTUDES SUR LES PROCESSUS SÉDIMENTAIRES DES VASES

Mes recherches sur les processus sédimentaires des vases m'ont permis de développer un modèle de tassement pour les vases molles. Selon ce modèle, le ralentissement du tassement avec l'augmentation de la concentration C s'explique principalement par une diminution du coefficient de perméabilité k. L'examen des mesures en colonne de consolidation réalisées par différents auteurs montre que dans la plupart des cas, k est relié à C par une loi exponentielle décroissante (équation 7) à deux paramètres. Ces paramètres peuvent être évalués par une méthode graphique à partir des courbes de tassement.

Ce modèle montre qu'il existe une continuité entre la vitesse de dépôt et la vitesse de tassement des vases molles, lesquelles peuvent être calculées par l'équation 6.

Mon modèle de tassement donne des résultats fiables pour l'évolution de la concentration à l'intérieur d'une couche de vase molle en cours de tassement. Des mesures en laboratoire du tassement à salinités variables réalisées sur une vase de Loire ont montré que l'augmentation de la salinité ne modifie pas le coefficient de perméabilité, mais qu'elle contribue à une réduction de la phase initiale du tassement se produisant à vitesse très lente.

Mes études sur le comportement rhéologique de la vase ont montré que celui-ci peut être caractérisé par la cohésion non drainée de ces matériaux. Des mesures en laboratoire ont montré que l'augmentation de la température fluidifie les vases molles.

L'interprétation des mesures de la cohésion non drainée et de la rigidité initiale ont montré que ces grandeurs ne peuvent être évaluées que d'un point de vue statistique avec un écart-type associé à la mesure. En effet, entre deux mesures consécutives réalisées sur un même échantillon en suivant un protocole, on constate que ces deux grandeurs peuvent varier considérablement, ce qui s'explique en partie par une certaine hétérogénéité naturelle de ces sédiments.

Des tests d'érosion sous l'action d'un courant réalisés dans un circuit hydraulique sur des vases de Loire ont permis d'ajuster une loi pour évaluer le taux volumique d'érosion pour ces vases. Cette loi fait intervenir d'une part la tension de cisaillement au fond qui caractérise la force érosive de l'écoulement, et d'autre part les paramètres caractérisant l'état physique des sédiments (rigidité initiale et masse volumique).

Une série de tests d'érosion réalisée sur une vase de Seine a montré que la loi ajustée pour la vase de Loire s'applique en Seine aussi, pour déterminer la tension de cisaillement au fond critique d'érosion, mais, celle-ci surestime d'un facteur 10 le taux d'érosion observé sur la vase de Seine.

Le rapport 1 à 10 dans le taux volumique d'érosion résiduel des lois d'érosion des vases de Seine et de Loire est difficile à expliquer. On peut avancer que cette différence est probablement liée à la nature de ces deux vases (composants différents), et au fait que la rigidité initiale et la cohésion sont deux paramètres qui ne caractérisent pas parfaitement la résistance d'une vase à l'action hydrodynamique d'un courant.

Les différences constatées entre les taux d'érosion des vases de Seine et de Loire montrent que la loi pour le taux d'érosion (équations 15 et 16) n'est pas universelle. Seules des mesures sur une grande variété des sédiments pourront permettre à terme, d'établir une loi valable dans tous les cas.

Les tests d'érosion réalisés en laboratoire ont montré que le taux volumique d'érosion doit être défini comme une grandeur statistique. En effet, sur deux essais successifs mis en œuvre conservant tous les paramètres constants, le taux d'érosion peut varier dans un rapport de 1 à 10, voire supérieur. Cette différence s'expliquerait par le fait que l'érosion se développe préférentiellement à partir des aspérités plus ou moins importantes créées par les érosions préalables de cette vase, ce qui rend le phénomène d'érosion peu répétitif par essence.

L'observation des agrégats issus de l'érosion des vases plastiques a montré que ceux-ci sont stables et résistants aux actions hydrodynamiques quand ils sont transportés en suspension. Les masse volumique de ces agrégats est approximativement celle du dépôt de vase dont ils sont issus.

RÉFÉRENCES EN RELATION AVEC L'ÉTUDES DES PROCESSUS SÉDIMENTAIRES DES VASES

Mémoires de thèse : A.1, T.2, T.3
Mémoires de DEA : DEA.4, DEA.9, DEA.15
Articles : A.2, A.3, A.4, A.6
Communications : B.1, B.2, B.5, B.10, B.11, B.12, B.15, B.16
Rapports d'études : C.1, C.3

CHAPITRE II

LES PROBLEMES HYDROSÉDIMENTAIRES DANS LES ESTUAIRES ET LES ZONES CÔTIÈRES

DIFFICULTÉS LIÉES À LA MODÉLISATION

Au cours de ma thèse de doctorat, j'ai mis au point un modèle numérique hydrosédimentaire unidirectionnel pour l'estuaire de la Loire (modèle ELOIRE). Ce modèle est composé d'un module hydraulique principal qui permet de déterminer, aux noeuds d'un maillage, les vitesses moyennes et les niveaux de la surface de l'eau. Ceci est possible par la solution numérique, avec un schéma explicite en différences finies, d'une équation de continuité et d'une équation de Navier-Stokes simplifiée, en satisfaisant, bien entendu, les conditions aux limites aval (côté océan) et amont (partie fluviale) du domaine étudié.

Dans chaque noeud, ce module tient compte des variations de la section transversale liées aux oscillations de la surface de l'eau. La tension de cisaillement au fond, qui est proportionnelle à la vitesse du courant au carré, est calculée à l'aide d'un coefficient de Strickler qui est l'un des paramètres d'ajustement du modèle.

Un module de transport dispersif de la salinité est couplé au module hydraulique. Les résultats de ces deux modules sont interdépendants car les gradients longitudinaux de salinité affectent l'hydrodynamique.

De plus, un module sédimentaire est aussi couplé au module principal. Il s'agit d'un modèle de transport dispersif des matières en suspension (MES) comprenant un terme puits et un terme source.

Le terme puits est le taux de dépôt des MES, calculé par la formulation de Krone (1984 *in* A.1) à l'aide d'une loi pour la vitesse de chute ajustée lors de mes travaux de thèse. Comme le modèle est monocouche, on tient compte de la stratification "artificiellement" grâce à la formulation de Rouse.

Le terme source est le taux d'érosion qui est calculé par l'équation de Partheniades qui considère que ce taux varie linéairement avec l'excès de tension de cisaillement (τ_o-τ_{oc}). La tension de cisaillement critique d'érosion τ_{oc} est déterminée par la loi de Migniot (1989 *in* A.6) qui tient compte de la rigidité initiale des sédiments (équations 11).

Enfin, comme la rigidité initiale varie avec la concentration des dépôts, le modèle "iso-concentration" de tassement sous poids propre de la vase est utilisé.

Le modèle hydraulique permet de reproduire correctement les lieux géométriques des basses mers et des pleines mers dans l'estuaire, surtout dans des conditions d'étiage, car dans ce cas la stratification saline est peu importante. Les vitesses moyennes du courant s'accordent elles aussi, assez bien avec les mesures disponibles.

La distribution de la salinité en étiage simulée est proche des valeurs observées, cependant, en crue, des écarts importants entre le modèle et les mesures sont constatés.

Les résultats de la modélisation sédimentaire ne sont valables que qualitativement. En effet, si l'emplacement du bouchon vaseux est bien reproduit en fonction du débit fluvial, ces simulations ne sont pas en mesure de donner des valeurs en accord avec la réalité,

simultanément, pour les concentrations en MES, pour la masse totale accumulée dans les formations de crème de vase en mortes-eaux et pour le taux résiduel d'envasement de l'estuaire.

La faible fiabilité des résultats issus de la modélisation sédimentaire avec le modèle ELOIRE peut être expliquée par les trois raisons présentées ci-après.

a) L'utilisation d'un modèle unidirectionnel monocouche dans lequel les effets liés à la stratification et à la distribution des sédiments dans la section transversale sont négligés. Seule l'utilisation d'un modèle tridimensionnel permet de résoudre ce problème ; cette solution est viable mais difficile à mettre en oeuvre car la modélisation hydraulique est très compliquée dans les écoulements stratifiés.
b) L'utilisation des lois pour l'érosion et pour le dépôt, qui ne sont pas adaptées pour reproduire les phénomènes observés. Des formulations plus fiables s'avèrent nécessaires.
c) Les écarts entre les observations en laboratoire et in situ liés aux effets d'échelle. Des campagnes de mesures ponctuelles sont indispensables à une bonne calibration des modèles et pour évaluer les nombreux paramètres qui sont pris en compte : rugosité des fonds, coefficient de diffusion (qui dépend de τ_o), taux de dépôt (qui dépend de τ_o, de la vitesse de chute et de la concentration en MES), taux d'érosion (qui dépend de τ_o et de la rigidité initiale des sédiments).

Mon objectif à moyen terme est de participer à l'amélioration de la qualité des simulations numériques hydrosédimentaires. L'utilisation du modèle ELOIRE m'a permis de cibler mes recherches vers l'étude des processus sédimentaires et vers les observations in situ, qui sont deux aspects préalables à la mise au point d'une modélisation plus fiable.

Dans une modélisation où il y a une multiplicité de paramètres et de processus qui interviennent, il est très utile d'identifier ceux qui sont de deuxième ordre d'importance et qui peuvent être éventuellement négligés. Mes travaux de recherche me permettent d'avancer les conclusions qui sont présentées par la suite.

a) L'érosion des vases consolidées en Loire, dont la concentration est supérieure à 390 kg m^{-3}, est un phénomène secondaire dans les modélisations à court terme allant de quelques jours à quelques mois.

   En effet, dans des conditions extrêmes (en dehors des grandes crues) la tension de cisaillement maximale au fond qui vaut environ 4 Pa (Hosseini 1999-T.3) n'est susceptible d'éroder ces vases qu'avec un taux volumique inférieur à 5×10^{-9} m s^{-1}. A titre indicatif on note que ce taux représente l'érosion d'une couche de sédiment de 0,4 mm en un jour, mais en réalité cette valeur n'a que peu de signification car elle correspond à l'érosion provoquée par les courants extrêmes en vives-eaux maximales, dont la durée d'action est très réduite.

   En revanche, l'érosion des vases consolidées doit être considérée dans les modélisations à long terme car celle-ci peut modifier la morphologie de l'estuaire. De même, ce phénomène doit être pris en compte si des travaux d'aménagement entraînent une augmentation importante des vitesses dans un secteur donné.
b) La formation du bouchon vaseux résultant principalement de l'érosion de la crème de vase, dont la loi d'érosion est étroitement liée à la rigidité initiale, la concentration de celle-ci est alors une variable de premier ordre d'importance. Le processus de tassement de la crème de

vase doit nécessairement être pris en compte dans les modélisations, alors que la consolidation des vases dont la concentration dépasse les 350 kg m^{-3} peut éventuellement être négligée (le modèle "iso-concentration" est adapté à la simulation du tassement des vases de concentration inférieure à 350 kg m^{-3}, et donc de la crème de vase).

c) La stratification des matières en suspension est un phénomène très important qui joue sur le taux de sédimentation et sur l'accumulation des sédiments près du fond. Ce phénomène ne peut être simulé que par un modèle bidimensionnel vertical, ou mieux encore, par un modèle tridimensionnel. Il apparaît ainsi, que les recherches in situ vers une meilleure connaissance de la vitesse de chute des sédiments et du coefficient de diffusion verticale, doivent être une priorité, car ces deux facteurs déterminent la stratification.

APPLICATIONS DE LA MODÉLISATION HYDRAULIQUE EN LOIRE

ENVASEMENT DU PORT-ABRI DE TRENTEMOULT

Le modèle unidirectionnel de l'hydraulique de l'estuaire de la Loire développé au cours de ma thèse de doctorat, a été utilisée dans 3 études de DEA que j'ai encadrées et dans 3 contrats de recherche.

Dans le cadre de l'étude de l'envasement du port-abri de Trentemoult qui est situé sur la rive sud de la Loire à proximité de la zone d'évitage du port de Nantes (Le Borgne 1992-DEA.1), le modèle unidirectionnel a permis de déterminer les conditions aux limites d'un modèle bidimensionnel du site.

D'une part, le modèle bidimensionnel du site, dont l'ajustement a été possible grâce à la mesure de vitesses locales, a permis de constater que les vitesses maximales au sein du port dépassent rarement 0,10 m s^{-1} alors qu'elles sont supérieures à 1,00 m s^{-1} dans le chenal de l'estuaire voisin. Ainsi, la position du port en marge de l'estuaire et sa configuration en forme d'anse, font de ce site une zone de calme hydrodynamique favorisant l'envasement (Sanchez *et al.* 1994-B.3).

D'autre part, le modèle bidimensionnel du site a permis de tester l'efficacité de plusieurs solutions possibles consistant à modifier la géométrie du port afin d'obtenir un accroissement des vitesses (Grovel *et al.* 1993-C.2).

ÉTUDE D'UNE VANNE RÉGULATRICE DES NIVEAUX EN LOIRE

Une deuxième application du modèle unidirectionnel de l'estuaire de la Loire a été réalisée dans le cadre d'une étude qui nous a été confiée par la Municipalité de Nantes. Ce modèle a permis d'étudier l'impact hydraulique lié à la suppression éventuelle des ouvrages en béton construits en 1900 qui sont très détériorés par endroits et qui recouvrent d'anciens quais en maçonnerie (moellons de granite) du XVIIIe siècle.

Cet aménagement implique un élargissement local de l'estuaire de l'ordre de 10 m. La modélisation numérique a montré que les conséquences sur l'hydraulique seraient seulement un abaissement des vitesses de l'ordre de 1%, n'affectant pas les niveaux de marée (Fattal *et al.* 1994-B.4, Fattal *et al.* 1993-C.5).

Le projet démolition des quais en béton afin de redécouvrir les anciens peut poser des problèmes de stabilité de ces derniers. En effet, si effectivement les anciens quais étaient stables au début de ce siècle, il est également certain que l'abaissement du niveau de l'eau dans l'estuaire observé au cours de ce siècle, se traduit par une diminution importante de leur coefficient de stabilité (Basseur 1997 *in* A.7). La vérification de la stabilité de ces ouvrages et le calcul des reconfortements éventuels, nécessitent une connaissance précise du niveau des plus basses mers possibles.

L'abaissement des niveaux des basses mers est un problème important en Loire. Des mesures de ces niveaux réalisées par les autorités portuaires à l'embouchure de cet estuaire montrent qu'entre 1969 et 1993 il est descendu d'une façon significative. Pour cette raison, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine a apporté une correction officielle de -0,40 m pour le zéro des cotes marines à St.-Nazaire à partir du 1er janvier 1996.

Juste après les derniers grands travaux de dragage du chenal de l'estuaire qui ont été réalisés entre 1969 et 1985, les niveaux des basses mers exceptionnelles d'équinoxe en étiage, par rapport au zéro cartes marines d'avant le1^{er} janvier 1996, étaient de (Migniot 1993 *in* A.7) :

-0,46 m à St.-Nazaire,
-0,63 m à Donges,
-0,25 m à Nantes.

Depuis cette date, ces niveaux sont stables à proximité de l'embouchure, mais à Nantes on a observé en 1991, en période de grande sécheresse, un niveau de basse mer de -0,43 m.

Afin de réguler les niveaux des basses mers dans la partie amont de l'estuaire et d'empêcher la remontée de la marée saline, la construction d'une vanne mobile de type Greenwich sur la Tamise, est envisagée pour l'estuaire de la Loire (Sauveterre Ingénieur Conseil 1993 *in* B.9, Fattal *et al.* 1994-B.4). En principe, cette solution devrait garantir la stabilité des berges et de tous les ouvrages situés en amont de la vanne.

L'impact d'une éventuelle vanne régulatrice sur l'hydrodynamique de l'estuaire de la Loire a été étudié par Gruau (1993-DEA.3). Cette étude montre qu'en cas de fermeture de cette vanne, on pourrait distinguer deux systèmes isolés dans l'estuaire :

a) en amont de la vanne on aurait un réservoir qui se remplirait graduellement selon le débit fluvial,
b) en aval de la vanne, l'estuaire serait soumis aux oscillations de la marée.

Deux emplacements de la vanne ont été simulés :

a) le premier au point kilométrique 50 afin de ne pas perturber la navigation en aval de Nantes tout en soutenant un niveau de basse mer à Nantes garantissant la stabilité des quais existant dans cette ville,
b) le deuxième, au point kilométrique 37,5, où la structure géologique est plus appropriée pour supporter ce type d'ouvrage.

Les simulations mathématiques de ces solutions montrent que l'hydraulique dans la partie de l'estuaire soumise à la marée serait modifiée radicalement par rapport aux conditions actuelles sans vanne (figure 11). En effet, une vanne en opération entraînerait une

amplification du marnage qui serait plus marquée en amont qu'en aval. Cette amplification serait plus importante si la vanne était implantée au point kilométrique 50.

Le phénomène physique qui explique cette amplification de l'onde de marée est la réflexion de celle-ci sur l'ouvrage de régulation des niveaux de basses mers. Ainsi, une onde réfléchie sur la vanne, se propageant vers l'aval, se superpose à l'onde de marée remontant l'estuaire. La réflexion est confirmée par la disparition du déphasage observée selon les résultats numériques tout le long de la partie aval de l'estuaire.

Enfin, on peut attribuer les abaissements des niveaux des basses mers observés ces dernières années entre l'embouchure de l'estuaire et Nantes, à un phénomène de réflexion semblable à celui observé nettement en présence d'une vanne (Grovel *et al.* 1999-A.7). Ainsi, il semble que la marée en Loire et dans les sites maritimes proches ne pourra se stabiliser qu'une fois que les sections transversales de l'estuaire resteront définitivement fixes.

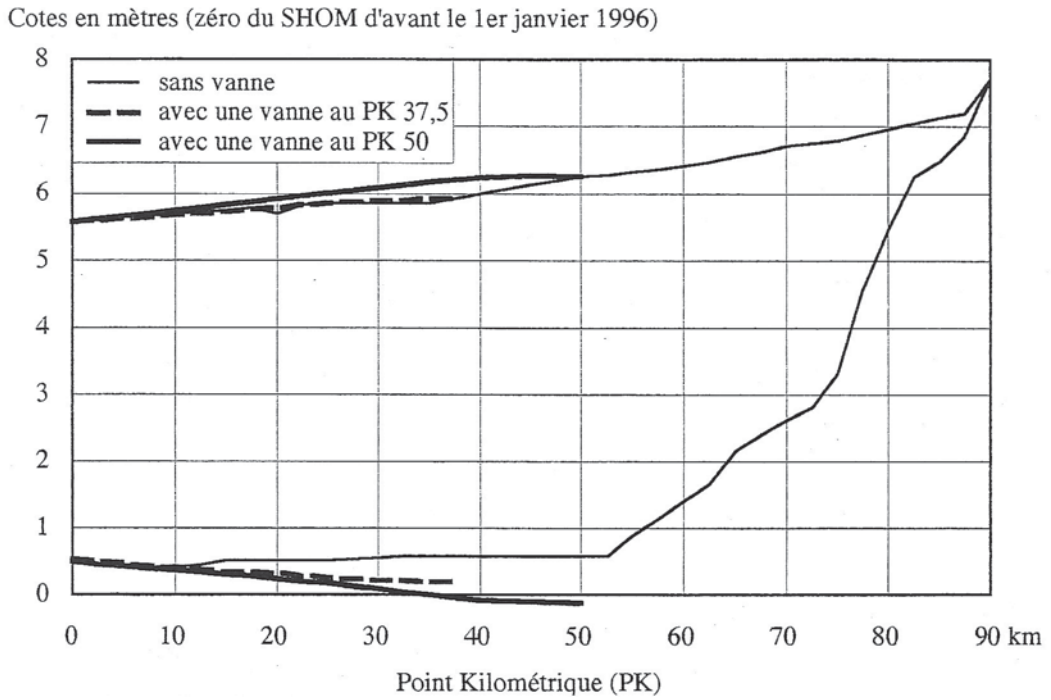


Figure 11 - Modélisation de la modification des niveaux de pleine mer et de basse mer par l'implantation, dans la partie médiane de l'estuaire de la Loire, d'une vanne régulatrice du niveau de basse mer.

MODÉLISATION MULTICOUCHE DE L'HYDRAULIQUE DE L'ESTUAIRE

Un modèle bidimensionnel vertical comportant 5 couches a été mis au point en collaboration avec Vrignaud (1995-DEA.10). Dans ce modèle on tient compte des gradients de densité liés à la salinité dont la propagation est modélisée par une équation bidimensionnelle de transport dispersif.

Dans ce modèle, les contraintes de Reynolds sont déterminées à l'aide d'une formulation simplifiée qui tient compte du gradient vertical de vitesses et qui permet d'obtenir un profil de vitesses en loi de puissance dans le cas limite d'un écoulement non stratifié.

Malgré les simplifications, ce modèle reproduit des vitesses résiduelles très faibles ou dirigées vers l'amont dans la partie inférieure de la tranche d'eau à proximité de l'embouchure, tandis que dans la partie amont de l'estuaire le profil de vitesses simulé est du type fluvial (figure 12). Ces vitesses pourraient expliquer l'accumulation des sédiments dans l'estuaire.

De plus ce modèle reproduit une stratification saline d'autant plus importante que le débit fluvial est grand (à coefficient de marée constant), ce qui est en accord avec les théories de Pritchard.

Bien que les résultats de ce modèle développé dans le cadre d'une recherche soient d'une assez bonne qualité, ce modèle doit être modifié pour pouvoir être utilisé dans l'étude de la dynamique sédimentaire ou dans des contrats extérieurs à l'université. Ces modifications concernent notamment la formulation de la constante de diffusion verticale et l'évaluation des contraintes de Reynolds.

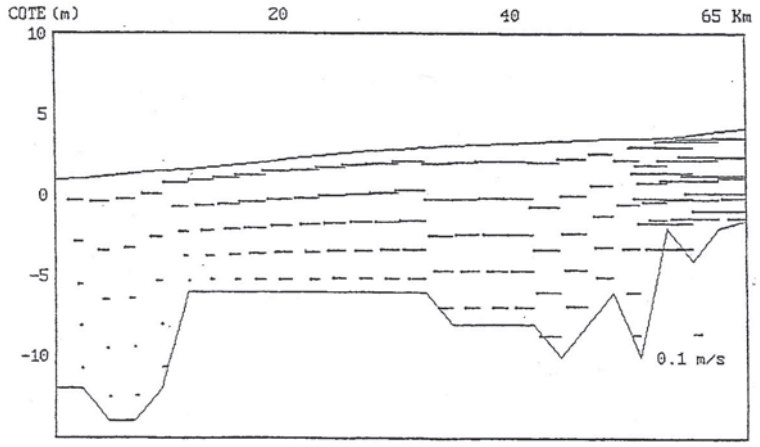


Figure 12 - Vitesses résiduelles simulées avec un modèle multicouche de la Loire, pour un coefficient de marée de 78 et un débit fluvial d'étiage (d'après Vrignaud 1995-DEA.10).

OBSERVATIONS DE LA CRÈME DE VASE EN LOIRE

Sur un cycle semi-lunaire de marées, le volume des vases consolidées érodées par les courants est négligeable devant le volume total contenu dans la crème de vase et dans les matières en suspension. On peut alors dire que les vases consolidées constituent un stock de vase peu mobile dont le volume constitue l'équivalent de plusieurs siècles d'apports solides par le fleuve (Sanchez et Grovel 1994-A.4).

Le stock de vases mobiles comprendrait alors la crème de vase et les matières en suspension. Le stock de vase mobile résulte d'un équilibre entre les apports par le fleuve, l'expulsion des matériaux vers la mer et les échanges avec les stocks de vase peu mobile. Dans l'estuaire de la Loire la vase mobile est formée en moyenne d'environ 1×10^9 kg de matière solide, soit l'équivalent de 8 mois d'apport par le fleuve dans des conditions moyennes.

En mortes-eaux, les sédiments mobiles s'accumulent principalement dans une lentille de crème de vase située au voisinage du front de salinité. La mesure en mortes-eaux de la quantité de sédiments contenus dans les formations de crème de vase à l'aide d'un échosondeur, est la méthode la plus fiable pour évaluer le stock de vase mobile.

Cette méthode qui a été très bien employée par Gallenne (1974 *in* A.4) dans ces travaux de thèse, lui a permis de présenter une description très claire de la dynamique sédimentaire en Loire. Néanmoins, l'estuaire étant un milieu changeant, des mesures de ce type sont toujours nécessaires.

Au cours de mes recherches, j'ai participé à deux campagnes d'évaluation du stock de vase mobile contenue dans la crème de vase entre Paimboeuf et Nantes.

La première de ces campagnes a été réalisée en collaboration avec Cousseau (1994-DEA.4) le 19 juin 1994. Le jour de cette campagne le coefficient de marée était de 60 et le débit fluvial mesuré la veille à Montjean était de 539 $m^3\ s^{-1}$.

Lors de cette campagne une lentille de crème de vase de 6,5 km de long et de 2 m d'épaisseur moyenne a été localisée dans la région de Cordemais. Le volume estimé de cette formation est de $1,3\times10^6\ m^3$. On peut estimer que ce volume représente $0,078\times10^9$ kg de matières sèches, car un échantillonnage de la crème de vase à l'aide d'une "flûte" conçue lors de cette étude avait permis d'évaluer une concentration moyenne de celle-ci de 60 $kg\ m^{-3}$.

De plus, le suivi de l'évolution de cette formation de crème de vase dans sa partie amont pendant un cycle de marée complet, a permis de faire les observations suivantes (Cousseau, 1994-DEA.4) :

- la lentille de crème de vase était présente sur tout le cycle de marée,
- aucun déplacement de la lentille n'a pu être décelé au cours d'un cycle de marée,
- les courants de flot ont engendré une érosion résiduelle de la crème de vase, ce qui s'explique par une forte turbulence accompagnant les courants pénétrant dans l'estuaire,
- les courants de jusant ont été accompagnés d'un engraissement résiduel de la lentille de crème de vase, ce qui s'explique en grande partie par la présence d'une lentille d'eau immobile près du fond (Berthois 1964 *in* A.5), lentille qui persiste pendant des périodes de plusieurs heures (jusqu'à 4 heures) en début du jusant.

En accord avec les observations réalisées sur le terrain avec un coefficient de marée inférieur à 70, les courants de jusant semblent être toujours accompagnés d'un engraissement résiduel de la lentille de crème de vase (Cousseau 1994-DEA.4).

La deuxième campagne de mesures avec l'échosondeur a été réalisée en collaboration avec Ouraq (1996-T.2) le 24 juillet 1996 par un coefficient de marée 46 et un débit fluvial mesuré la veille à Montjean de 200 $m^3\ s^{-1}$. Lors de cette campagne on a détecté deux formations de crème de vase dont le volume total était de $13,65\times10^6\ m^3$, ce qui représente $0,82\times10^9$ kg de matières sèches (figure 13).

Ces deux campagnes réalisées à deux années d'intervalle dans la même saison montrent que le stock de vase mobile est très variable dans le temps. Plus particulièrement, la forte différence observée dans le volume de crème de vase entre 1994 et 1996 s'explique en grande partie par les crues importantes qui ont précédé la première campagne qui seraient à l'origine d'une évacuation importante des vases vers la mer.

Il semble que la mesure des volumes de crème de vase en mortes-eaux représente potentiellement l'un des meilleurs moyens de prévision à court terme de l'importance qu'aura le bouchon vaseux en vives-eaux.

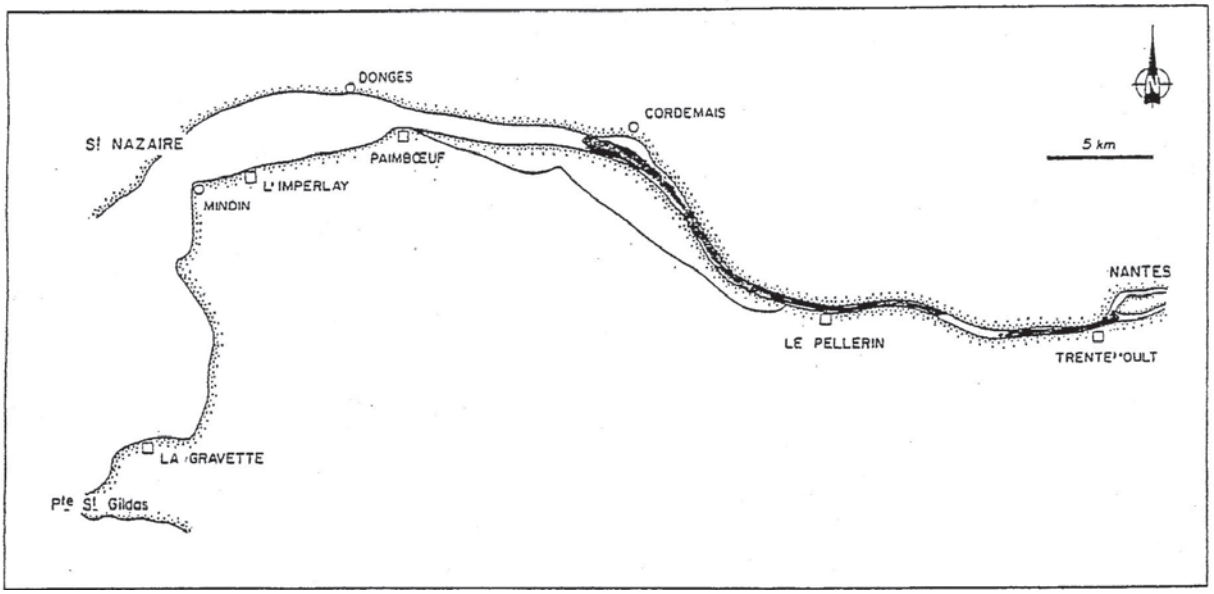


Figure 13 - Emplacement de la crème de vase lors de la campagne du 24 juillet 1996 (d'après Ouraq 1996-T.2).

ESTIMATION DU TAUX D'ENVASEMENT DU CHENAL DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE

Les observations de la dynamique des formations de crème de vase en Loire et les simulations de son tassement par le modèle "iso-concentration", permettent d'évaluer le taux d'envasement du chenal de l'estuaire.

Ce taux d'envasement résulte principalement de la transformation de crème de vase en dépôt consolidé peu mobile. La définition de la crème de vase en Loire dont la détection est possible grâce à un échosondeur émettant en deux bandes de fréquence, considère que la frontière entre la crème de vase et les dépôts peu mobiles correspond à une concentration C_{FF}=300 kg m^{-3}. Au-dessus de cette concentration la vase est peu érodée par les courants et suffisamment rigide pour avoir un comportement du type solide.

Or, selon le modèle de tassement, la quantité de vase dépassant la concentration C_{FF} par unité de surface et par unité de temps est : $Q_{s/CFF}=5\times10^{-6}$ kg m^{-2} s^{-1}. Ainsi, sachant que la taille moyenne des formations de crème de vase en Loire est d'environ 12500 m de longueur et 300 m de largeur et que sa présence est enregistrée essentiellement en mortes-eaux (Gallenne 1974 *in* A.5), soit en moyenne 6 jours sur 15, on évalue un taux global de transformation de crème de vase en dépôt peu mobile dans le chenal de l'estuaire de $2,5\times10^{8}$ kg an^{-1} (Sanchez et Grovel 1995-A.5).

Cette quantité est 4 fois inférieure au taux résiduel moyen de sédimentation de l'estuaire de la Loire estimé à 1×10^{9} kg an^{-1} par différents auteurs (CSEEL 1984 *in* A.5; Delft hydraulics 1994 *in* A.5). Cette différence peut s'expliquer par certains mécanismes d'envasement n'ayant pas été considérés dans cette étude, à savoir : dépôts préférentiels sur les rives où les courants sont faibles, transferts directs de vase en suspension vers les dépôts peu mobiles et formations de crème de vase en dehors du chenal de l'estuaire.

IMPACT DES TRAVAUX D'AMÉNAGEMENT SUR LA DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE EN LOIRE

Les travaux d'aménagement qui modifient les courants affectent la dynamique sédimentaire. Les modèles hydrauliques permettent une prévision fiable des modifications des courants accompagnant les éventuelles modifications de la morphologie d'un estuaire.

En principe, une augmentation locale des vitesses des courants entraîne une augmentation potentielle des érosions, tandis que les diminutions de ces vitesses s'accompagne d'une augmentation des sédimentations.

On présente par la suite trois méthodologies servant à évaluer l'impact des travaux d'aménagement sur la dynamique sédimentaire développées autour de trois applications concrètes. Ces méthodologies sont basées sur une modélisation des principaux processus sédimentaires en jeu (transport, dépôt, tassement, érosion), sans faire appel à un modèle hydrosédimentaire global de l'estuaire (Grovel *et al.* 1999-A.7).

TAUX D'ENVASEMENT RÉSIDUEL DU CHENAL DE L'ESTUAIRE EN FACE DE MONTOIR

A la suite des travaux de dragage réalisés entre St.-Nazaire et Donges entre 1976 et 1981, la cote du chenal dans ce secteur est passée de -10,00 m CM à -13,25 m CM. Ces travaux ont entraîné, dans la partie aval de l'estuaire, une diminution des vitesses maximales d'environ 15%. Dans ce qui suit, l'accroissement du taux d'envasement du chenal provoqué par cette réduction des vitesses est estimé.

La connaissance du gradient de concentration dans la crème de vase est un élément primordial pour définir le taux d'envasement (Migniot 1989 *in* A.7). En effet, au cours d'un cycle semi-lunaire de marées, on peut considérer qu'une fraction de crème de vase s'étant consolidée, dont la rigidité initiale dépasse une valeur critique suffisante pour résister à l'action des courants les plus forts des marées de vives-eaux moyennes, représente le taux d'envasement résiduel du chenal sur 14,5 jours.

Alors, si l'on connaît la vitesse U maximale du courant de vive-eau moyenne, on peut estimer le taux d'envasement sur un cycle semi-lunaire de marée dans un site où des formations de crème de vase sont observées régulièrement en mortes-eaux. La méthodologie à suivre est composée des étapes ci-dessous (Sanchez *et al.* 1999-A.7) :

a) on détermine la tension de cisaillement au fond maximale en fonction de U,
b) on évalue la rigidité initiale et la concentration critique C_c des vases qui résistent à cette action de l'écoulement par la première des équations 16,
c) on détermine par le modèle de tassement, la quantité de vase ayant dépassé la concentration critique C_c après 6 jours de mortes-eaux ; cette quantité représente le taux d'envasement sur 14,5 jours.

Sachant qu'en 1976, la vitesse du courant maximale en surface par une marée de vive-eau moyenne (de coefficient 95) était, en face de Montoir, de 2,40 m s^{-1}, on peut déterminer que ce courant peut éroder les vases dont la concentration est inférieure à 325 kg m^{-3} (et dont la rigidité initiale associée est inférieure à 54,4 Pa). Le modèle de tassement permet alors d'évaluer un taux d'envasement résiduel de 27,7 kg m^{-2} an^{-1}, ce qui représente une couche de 0,08 m par an (Sanchez *et al.* 1999-A.7).

Après les travaux de dragage qui ont amené la cote du fond à -13,25 m CM en aval de Donges, la vitesse maximale en surface par une marée de vive-eau moyenne en face de Montoir s'établit à environ 2,04 m s^{-1}. Ces travaux ont fait diminuer le pouvoir érosif des courants dans la partie aval de l'estuaire, de sorte que les vases susceptibles d'être remises en suspension sont celles dont la concentration est inférieure à 305 kg m^{-3} (et dont la rigidité initiale associée est inférieure à 39,6 Pa). En suivant la démarche décrite ci-dessus, on évalue un taux d'envasement résiduel dans le chenal de l'estuaire en face de Montoir de 57,3 kg m^{-2} an^{-1}, soit une couche de 0,16 m par an (Sanchez *et al.* 1999-A.7).

Il faut noter qu'entre 1988 et 1992 l'épaisseur des dragages dans le secteur de Montoir s'établit à environ 1,20 m par an (Migniot 1993 *in* A.7). Cette valeur est 7,5 fois supérieure au taux d'envasement résiduel estimé ci-dessus pour les conditions d'après 1981. La grande différence entre ces deux valeurs peut avoir plusieurs explications :

- l'incertitude des estimations théoriques,
- les dragages réalisés en mortes-eaux de sédiments qui pourraient être remis en suspension par les courants de vive-eau,
- le dragage de vases consolidées issues probablement d'un glissement de talus.

En tout état de cause, l'interprétation des résultats doit se faire en fonction d'une variation relative du taux d'envasement car les évaluations de celui-ci comportent une incertitude absolue importante. Ainsi, on peut dire que les travaux de dragage réalisés après 1976 en aval de Donges, ont contribué à une augmentation d'environ 100% du taux d'envasement résiduel en face de Montoir, et donc, à une augmentation du même ordre de grandeur des dragages d'entretien nécessaires du chenal de navigation dans ce secteur, ce qui est l'ordre de grandeur réel observé après travaux (Migniot 1993 *in* A.7).

Dans les conditions actuelles, une partie de la vase draguée dans le secteur de Montoir lors des travaux d'entretien peut avoir une concentration de l'ordre de 660 kg m^{-3}, soit une densité d'environ 1,40 (Migniot et Le Hir 1994 *in* A.7). Il s'agit donc d'une vase très surconsolidée dont la présence ne peut pas s'expliquer par la consolidation de la crème de vase, car ce processus engendre des dépôts superficiels d'une concentration maximale de l'ordre de 350 kg m^{-3} (soit une densité d'environ 1,21). En conséquence, il est probable qu'une partie de la vase draguée lors des travaux d'entretien du chenal de navigation provienne du glissement des talus latéraux de ce chenal.

TAUX D'ENVASEMENT D'UNE SOUILLE DANS L'ESTUAIRE (PORT DE TRENTEMOULT)

Le taux d'envasement dans un site est en étroite relation avec les cotes des fonds. En effet, dans un site initialement en équilibre sédimentaire, où les dépôts et les érosions se compensent pour donner un taux d'envasement résiduel nul, la réalisation de dragages s'accompagne généralement d'un envasement jusqu'à ce que les cotes des fonds reviennent à leur état initial.

Ce phénomène concerne particulièrement les souilles situées dans la zone à forte turbidité d'un estuaire car celles-ci peuvent se comporter comme des véritables pièges à sédiments. En effet, au cours d'un cycle semi-lunaire de marées, la plus grande partie de la vase "mobile" se trouve alternativement sous la forme de crème de vase en mortes-eaux et de

matières en suspension en vive-eau, avec un taux résiduel d'envasement de l'ordre de quelques millimètres par cycle de marée (figure 14a). Cependant, une grande partie de la crème de vase qui remplit une souille au cours des mortes-eaux n'est pas remise en suspension en vive-eau car le pouvoir érosif du courant diminue dû à l'abaissement très localisé des fonds (figure 14b).

Le port de Trentemoult situé en face de la ville de Nantes constitue un exemple remarquable de ce phénomène. Au printemps 1997 ce port a été dragué sous la forme d'une souille sur une profondeur moyenne d'environ 3 m et une surface de 8000 m^2. Avant les travaux de dragage la cote moyenne du fond était voisine de +3,00 m CM et le taux d'envasement représentait quelques centimètres par an.

Cependant, 6 mois après les dragages, la cote moyenne du fond est revenue pratiquement à sa valeur initiale par suite d'un accroissement considérable du taux d'envasement. Ce phénomène s'explique par le piégeage de la crème de vase présente dans cette zone de l'estuaire en étiage et par le faible pouvoir érosif des courants au sein de ce port, courants qui dépassent rarement une vitesse de 0,20 m s^{-1}.

Les souilles implantées dans les zones où la crème de vase est susceptible de se former, peuvent, dans l'estuaire de la Loire, être soumises à un taux d'envasement dépassant les 2 m au cours d'un seul cycle semi-lunaire de marées. L'implantation de souilles dans les zones à forte turbidité des estuaires, implique la réalisation de dragages d'entretien très fréquents et plus ces dragages sont fréquents, plus le taux d'envasement annuel est important.

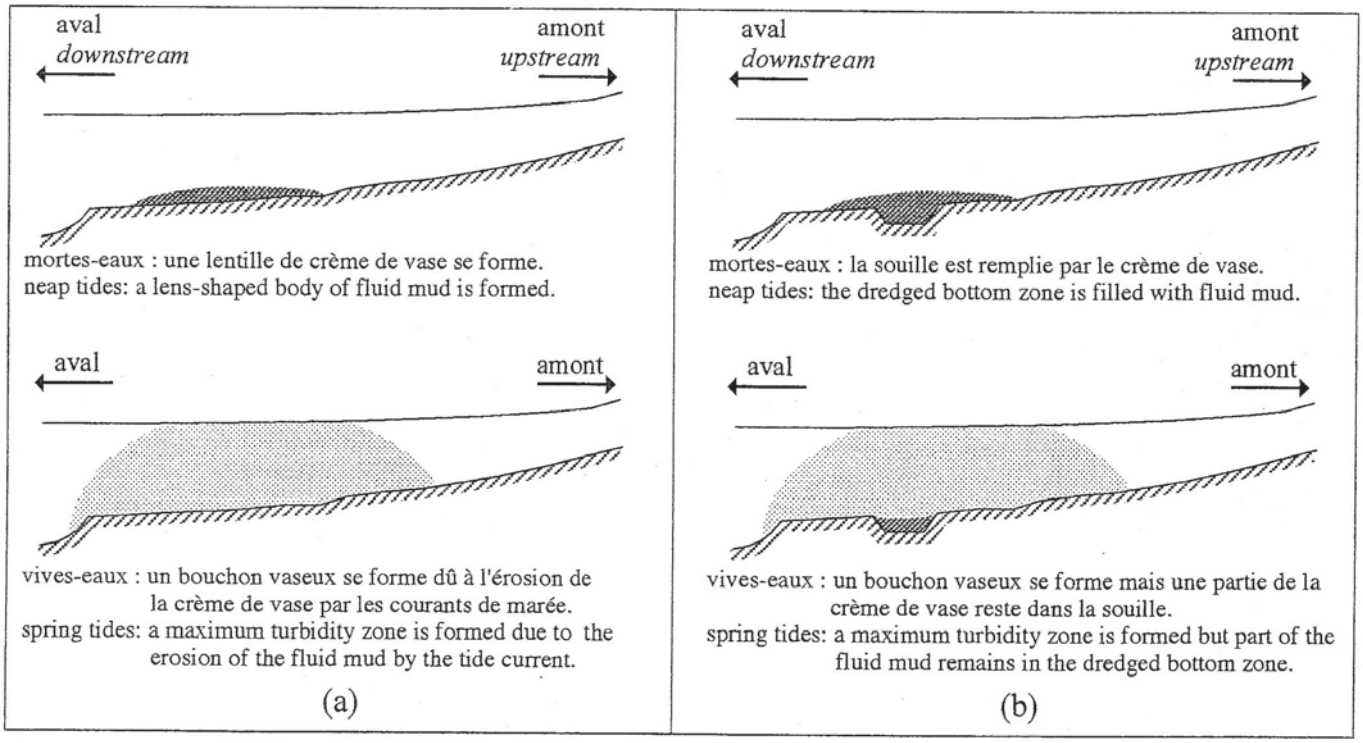


Figure 14 - Illustration du cycle sédimentaire suivi par les vases dans un estuaire en relation avec l'amplitude de la marée (d'après Sanchez et al. 1999-A.7).
(a) En l'absence de souilles (b) En présence d'une souille.

ÉROSIONS PRÉVISIBLES PAR L'ACCROISSEMENT DES VITESSES DANS UN POINT EN ÉQUILIBRE SÉDIMENTAIRE

Les travaux de calibrage du chenal de navigation par la construction d'épis ou les dragages des sables en amont de l'estuaire, sont susceptibles de modifier l'hydraulique par un accroissement des vitesses du courant. L'accroissement des vitesses s'accompagne en général, par une érosion des secteurs de l'estuaire qui étaient préalablement en équilibre sédimentaire.

L'épaisseur de la couche érodée dépend principalement du gradient vertical de concentration dans les dépôts du fond et de l'importance de l'accroissement de la tension de cisaillement maximale à l'interface eau-sédiment (en marées de vive-eau exceptionnelles).

Par analogie avec les sables déposés en équilibre sédimentaire dont le diamètre est relié aux actions hydrodynamiques extrêmes, on peut dire que dans un secteur où la vase est en équilibre sédimentaire, les sédiments en surface ont exactement la rigidité initiale qui leur permet de résister aux actions hydrodynamiques extrêmes.

L'accroissement des vitesses du courant dans ces secteurs se traduit par une augmentation du pouvoir érosif et donc par un dégraissage des fonds. Les érosions peuvent être estimées en suivant la méthodologie ci-dessus (Sanchez *et al.* 1999-A.7) :

- on estime la tension de cisaillement au fond liée aux actions hydrodynamiques extrêmes,
- on évalue la concentration maximale des vases susceptibles d'être érodés avec ces tensions de cisaillement,
- on évalue l'épaisseur de la couche de vase érodable à partir du profil vertical de concentrations dans le dépôt.

ÉTUDE DU DÉSENVASEMENT PAR AGITATION

La situation du port-abri de Trentemoult en marge de l'estuaire de la Loire, sur la rive gauche, en face de la ville de Nantes, et sa configuration en forme d'anse, font de ce site un endroit privilégié pour les accumulations des vases. Ces accumulations se sont accentuées par les modifications du régime hydraulique de l'estuaire qui se sont produites dans les années soixante et soixante-dix, lesquelles ont entraîné une remontée de la zone de forte turbidité dans l'estuaire.

Dans le projet initial d'aménagement de ce port réalisé en 1965, l'engraissement des fonds a été estimé à 1 m tous les deux ou trois ans sur la surface totale qui est de 8000 m^2. Les premiers dragages d'importance ont été effectués en 1979 lors de la construction de l'actuel port. Le mois de septembre de cette année-là, on a relevé une cote des fonds de +1,00 m CM alors qu'elle était de -1,50 m CM un mois et demi auparavant ; l'envasement pendant cette période est estimé à 15000 m^3.

D'autres dragages d'entretien effectués dans ce port ont été : 17000 m^3 en 1985, 19800 m^3 en 1989, 25700 m^3 en 1991. Ces dragages se sont avérés inefficaces même à court terme. Il a fallu donc, se rendre à l'évidence que le taux d'envasement estimé en 1965 n'est plus valable dans les conditions actuelles.

Les dragages par agitation est l'une des solutions les mieux adaptées pour l'entretien des fonds dans les zones à boue fluide (Van Oostrum 1980 *in* B.3). Dans le but de tester l'efficacité du dragage par agitation, un agitateur "Flygt" d'une masse de 500 kg d'une

puissance de 15 kilowatts a été installé sur l'un des pieux qui assurent la fixation des 3 pontons du port (Charrier et Desmet 1992-EN.1, Grovel *et al.* 1993-C.2) (figure 15a). Ce type d'agitateur est conçu pour engendrer une circulation des eaux chargées en MES dans les stations d'épuration.

Avant la mise en fonctionnement de l'agitateur, un échantillon de la vase en surface a été prélevé. La concentration était de 312 kg m^{-3} et sa rigidité initiale de 5,27 Pa.

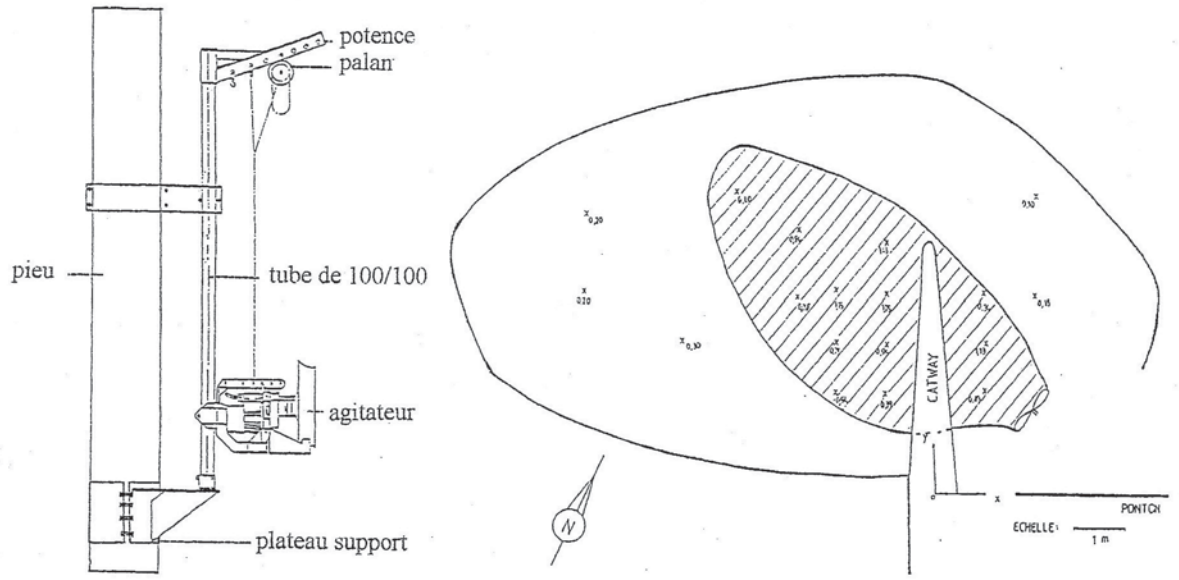
Après 48 minutes d'utilisation de l'agitateur, on a constaté une érosion de 23 m^3 sur une surface de 42 m^2 et selon un panache long de 12 m, ce qui permet d'évaluer un taux d'érosion d'environ 0,50 m^3 par minute (figure 15b).

Après 12 heures de fonctionnement l'effet érosif atteignait une longueur de 23 m et concernait une surface de 100 m^2. Cette surface est délimitée par la courbe iso-vitesse 0,50 m s^{-1} du diagramme de vitesses fourni par le constructeur.

La limite de l'action érosive de l'agitateur est en accord avec la condition critique établie par Migniot (1989 *in* A.2) pour une érosion généralisée. En effet, selon l'équation 11b, la vitesse de cisaillement critique d'érosion u_{*c} de la vase de surface du port est de 0,021 m s^{-1}. Cette valeur de u_{*c} correspond sensiblement à une vitesse moyenne de l'écoulement de 0,50 m s^{-1} pour un tirant d'eau de 2 m (Charrier et Desmet 1992-EN.1).

De plus cet agitateur a l'avantage d'incorporer 83% du matériau érodé à l'eau de l'écoulement, ce qui assure l'évacuation de la vase vers le chenal de l'estuaire. Le 17% restant du matériau se dépose sous la forme de galets de vase d'environ 5 cm de diamètre au-delà de la zone érodée.

En conclusions de cette étude on préconise l'utilisation d'un agitateur monté sur une barge mobile pour les dragages d'entretien du port de Trentemoult. Cette barge doit être capable de mettre en oeuvre 4 éléments : un agitateur, une source électrique, une propulsion et un système d'ancrage.



(a) (b)

Figure 15 - Tests d'érosion par agitation dans le port-abri de Trentemoult.
(a) Schéma d'installation de l'agitateur (b) Plan du panache érodé en 48 minutes.

SYNTHÈSE DES ÉTUDES SUR LES PROBLÈMES HYDROSÉDIMENTAIRES

Grâce aux connaissances actuelles en mécanique des fluides, les modèles numériques unidirectionnelles permettent la reproduction des courbes de marée dans un estuaire avec une grande précision notamment si la stratification saline est peu marquée. Les courants de marée sont également reproduits fidèlement. Cependant, les études des problèmes hydrosédimentaires nécessitent au minimum une simulation hydraulique verticale en 2 dimensions, ou mieux, en 3 dimensions. Ces simulations sont délicates à mettre en œuvre du fait des simplifications qui sont nécessaires afin de simuler les problèmes de stratification.

Une connaissance approfondie des conditions hydrauliques, de la dynamique sédimentaire et du comportement des sédiments sous les actions hydrodynamiques, permet les études d'impact des travaux d'aménagement estuarien sur la dynamique sédimentaire. Ces études nécessitent donc, une grande quantité de mesures en laboratoire afin de caractériser le comportement des sédiments par le biais des lois de variation en fonction de la concentration, de la vitesse de chute des matières en suspension, du coefficient de perméabilité, de la contrainte effective, de la rigidité initiale et de la tension de cisaillement critique d'érosion. Les observations in situ sont également indispensables afin de définir les secteurs où les formations turbides importantes se présentent.

Le processus sédimentaire le plus mal connu à nos jours semble être le dépôt des matières en suspension qui dépend à la fois du coefficient de diffusion verticale de masse ε et de la vitesse de dépôt des sédiments. Or, si des modèles mathématiques permettent de relier correctement ε au coefficient de viscosité cinématique turbulente, la vitesse de dépôt n'est bien connue que dans les cas d'une chute en eau calme (vitesse de chute en laboratoire). Des mesures sur le terrain s'avèrent ainsi nécessaires pour déterminer la vitesse de dépôt réelle des sédiments à partir de l'évolution de la stratification des matières en suspension dans les eaux, et ceci en fonction des courants de marée.

La nature des sédiments observés dans les différents secteurs d'un estuaire n'est pas arbitraire mais corrélée aux actions hydrodynamiques locales. Dans l'avenir, les modèles hydrosédimentaires doivent permettre une meilleure explication de la répartition des sédiments dans un estuaire, mais ceci à condition de mieux connaître l'interaction entre les sables et les vases quand ces sédiments sont mélangés ou présents en couches alternées.

RÉFÉRENCES EN RELATION AVEC LES PROBLÈMES HYDROSÉDIMENTAIRES

Mémoires de thèse : T.1
Mémoires de DEA : DEA.1, DEA.2, DEA.3, DEA.5, DEA.6, DEA.10, DEA.12
Projets de fin d'études : EN.1, EN.2
Articles : A.5, A.7, A.9
Communications : B.3, B.4, B.6, B.9, B.13
Rapports d'études : C.2, C.4, C.5, C.8, C.10, C.11, C.12

CHAPITRE III

L'AGITATION PORTUAIRE

MODÉLISATION DE L'AGITATION DANS UN BASSIN PORTUAIRE

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES PHÉNOMÈNES DE DIFFRACTION ET DE RÉFLEXION

L'étude mathématique de la propagation de la houle monochromatique est réalisée habituellement en considérant que l'écoulement est irrotationnel. Les vitesses dérivent alors d'un potentiel complexe qui satisfait les conditions aux limites propres à un fond imperméable et à une surface libre isobare. Ce potentiel Φ s'écrit comme suit :

$$\Phi = -\frac{i\,g\,a_o}{\omega}\,\phi(x,y)\,\frac{\cosh\left[k(z+d)\right]}{\cosh(kd)}\exp(-i\omega t) \qquad (18)$$

où $\phi(x,y)$ désigne une fonction potentielle réduite complexe qui doit être déterminée cas par cas, x et y sont les coordonnées cartésiennes du plan horizontal, z la coordonnée verticale (positive vers le haut et ayant pour origine le niveau de repos), i la racine carrée de -1, g l'accélération de la pesanteur, a_o l'amplitude de l'onde incidente de référence égale à une demi-fois la hauteur de la houle incidente, d la profondeur, k le nombre d'onde et ω la fréquence angulaire. Les grandeurs k et ω sont liées par la relation de dispersion qui suit :

$$\omega^2 = gk\tanh(kd) \qquad (19)$$

La fonction $\phi(x,y)$ caractérise l'amplitude des oscillations et la phase dans chaque point du domaine examiné. Dans ce domaine, cette fonction est régie par une équation différentielle partielle, avec des conditions aux limites appropriées, tenant compte de la houle incidente et des éventuelles réflexions au niveau des frontières délimitant le domaine étudié. Lorsque la houle est sinusoïdale et que la profondeur est constante, la fonction potentielle réduite ϕ est gouvernée par l'équation d'Helmholtz :

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + k^2\phi = 0 \qquad (20)$$

Si la frontière entre le domaine étudié et la mer est désignée par Γ, et la fonction potentielle réduite caractérisant l'onde progressive incidente de référence par ϕ_w, la fonction potentielle réduite ϕ sur cette frontière est donnée par :

$$\phi = \phi_w + \phi_{pe} \quad \text{, avec : } \quad \phi_w = \exp\left[\, i\,k\,(x\cos\theta_w + y\sin\theta_w)\right] \text{ , sur } \Gamma \qquad (21)$$

où ϕ_{pe} est la fonction potentielle réduite liée à l'onde perturbée qui se propage vers l'extérieur du domaine étudié et θ_w l'angle entre la direction d'incidence de la houle de référence et l'axe Ox. La condition de continuité de la vitesse normale à cette frontière impose alors la condition suivante :

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = \frac{\partial\phi_w}{\partial n} + \frac{\partial\phi_{pe}}{\partial n} \quad \text{, avec : } \quad \frac{\partial\phi_{pe}}{\partial n} = -i\,k\,\phi_{pe}\cos\gamma_{pe} \text{ , sur } \Gamma \qquad (22)$$

où n est la normale à la frontière entre le domaine étudié et la mer ouverte, positive vers l'intérieur du domaine étudié, et γ_{pe} l'angle entre la direction d'incidence de l'onde perturbée se propageant vers l'extérieur du domaine étudié et $\vec{n}$.

A l'heure actuelle les méthodes numériques assistées par ordinateur permettent de résoudre l'équation différentielle partielle gouvernant ϕ avec une très grande précision. La qualité des résultats ainsi obtenus dépend essentiellement de la connaissance des paramètres propres à la houle incidente (hauteur de houle et direction) et aux frontières réfléchissantes (coefficient de réflexion K et déphasage lié à la réflexion β).

Au cours de mes travaux de recherche j'ai participé à la mise au point d'un modèle numérique de simulation de l'agitation dans un bassin portuaire qui tient compte des phénomènes de diffraction et de réflexion.

Dans ce modèle, un maillage rectangulaire est utilisé pour discrétiser le domaine étudié. L'équation d'Helmholtz est résolue en utilisant la méthode en différences finies implicite avec un schéma centré aux noeuds du maillage à l'intérieur du domaine étudié et avec un schéma décentré sur les frontières (Chardin 1995-DEA.7, Sanchez 1996-B.8).

Ce modèle est utilisé surtout comme un outil d'enseignement et de recherche pour étudier l'agitation dans les bassins portuaires à géométrie complexe. En effet, on constate dans ces cas que l'utilisation des abaques de diffraction est très difficile à mettre en œuvre et les résultats obtenus sont peu précis.

Les techniques numériques utilisées pour développer le modèle d'agitation sont très connues et largement répandues. La seule contribution de mes travaux à la simulation de l'agitation, concerne la modélisation des conditions de frontière liées à une paroi plus ou moins réfléchissante. En effet, j'ai démontré que si β=0, la fonction potentielle réduite ϕ et la phase ψ, sont reliées au niveau de ces frontières par :

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = i \frac{\partial \psi}{\partial n} \phi \qquad \text{, avec :} \quad \frac{\partial \psi}{\partial n} = -\frac{1-K}{1+K} k \cos\gamma \tag{23}$$

où ψ est la phase de la fonction potentielle réduite (ϕ = A exp (i ψ)) et γ l'angle entre la direction d'incidence de la houle et $\vec{n}$. La difficulté pour appliquer cette expression est double. D'un côté, la direction d'incidence de la houle sur une paroi n'est pas connue a priori. D'un autre côté, lorsque l'agitation est stationnaire et/ou tridimensionnelle, la notion de direction de propagation de la houle perd toute signification. On est alors obligé d'avancer une définition pour la direction de la propagation de la houle qui soit la plus réaliste possible.

Afin d'approcher la dernière équation ci-dessus, une démarche originale est suivie. Une première estimation de ϕ est obtenue en prenant γ=0° sur toutes les parois (équation 23). Pour la deuxième estimation, on calcule les conditions aux limites en utilisant l'expression 24 ci-dessous (développée dans mes études) :

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = i \frac{\partial \psi}{\partial n} \phi \qquad \text{, avec :} \quad 0 \le -\frac{\partial \psi}{\partial n} \le \frac{1-K}{1+K} k \tag{24}$$

Par la suite, on répète ce processus jusqu'à l'invariabilité des résultats obtenus. D'une façon pratique, trois itérations suffisent.

Habituellement l'agitation en chaque point d'un bassin est caractérisée par le rapport de l'amplitude locale de la houle a, sur l'amplitude de la houle incidente de référence a_o, lequel est donné par l'amplitude ou module de ϕ, soit :

$$\frac{a}{a_o} = |\phi| \tag{25}$$

La phase de la houle ψ est l'argument de la fonction potentielle ϕ. Pour ϕ=0+i0, la phase est indéfinie ; ceci est le cas dans les points amphidromiques où l'amplitude est nulle.

Un flux d'énergie adimensionnel P* peut être défini par l'expression suivante :

$$P^* = \frac{P}{\rho g {a_o}^2 C_g / 2} = \left[\left(F\frac{\partial G}{\partial kx} - G\frac{\partial F}{\partial kx} \right)^2 + \left(F\frac{\partial G}{\partial ky} - G\frac{\partial F}{\partial ky} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{26}$$

où F et G sont respectivement, la partie réelle et imaginaire de la fonction potentielle réduite (ϕ=F+iG), C_g est la célérité de groupe et P le flux d'énergie transmis par la houle selon l'expression de Miche (appelé aussi puissance de la houle). Le calcul du flux d'énergie par la houle incidente conduit à P*=1. Il faut noter que le flux d'énergie est représenté par un vecteur ayant une composante selon x et une composante selon y.

Dans le but de valider le modèle d'agitation portuaire et d'étudier le rôle de la réflexion sur l'agitation, la propagation de la houle dans un bassin portuaire a été modélisée. Il s'agit d'un bassin rectangulaire à profondeur constante ayant été étudié par plusieurs auteurs (Isaacson et Qu 1990 *in* B.14, Pos et Kilner 1987 *in* B.14). Cette configuration simple est représentée sur la figure 16. On considère une incidence de la houle suivant l'axe de symétrie du bassin.

La figure 17 montre la distribution de l'agitation évaluée après deux itérations de calcul. La solution analytique de Blue et Johnson (Shore Protection Manual -SPM- 1984 *in* B.14) et les mesures expérimentales de Pos et Kilner (1987 *in* B.14) sont représentées sur cette même figure. On constate que les résultats numériques s'approchent de la solution analytique ; cependant, ils montrent un écart appréciable vis-à-vis des résultats expérimentaux, lequel peut être expliqué par les difficultés inhérentes aux essais en laboratoire lorsque l'on désire reproduire une absorption totale de l'énergie par les parois.

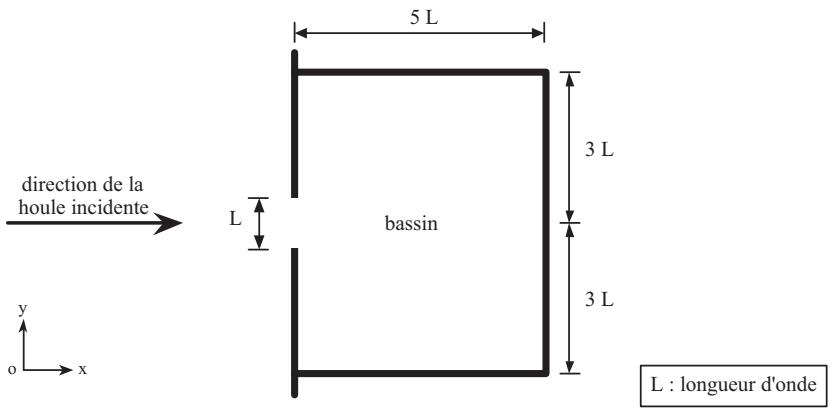


Figure 16 - Configuration du bassin étudié.

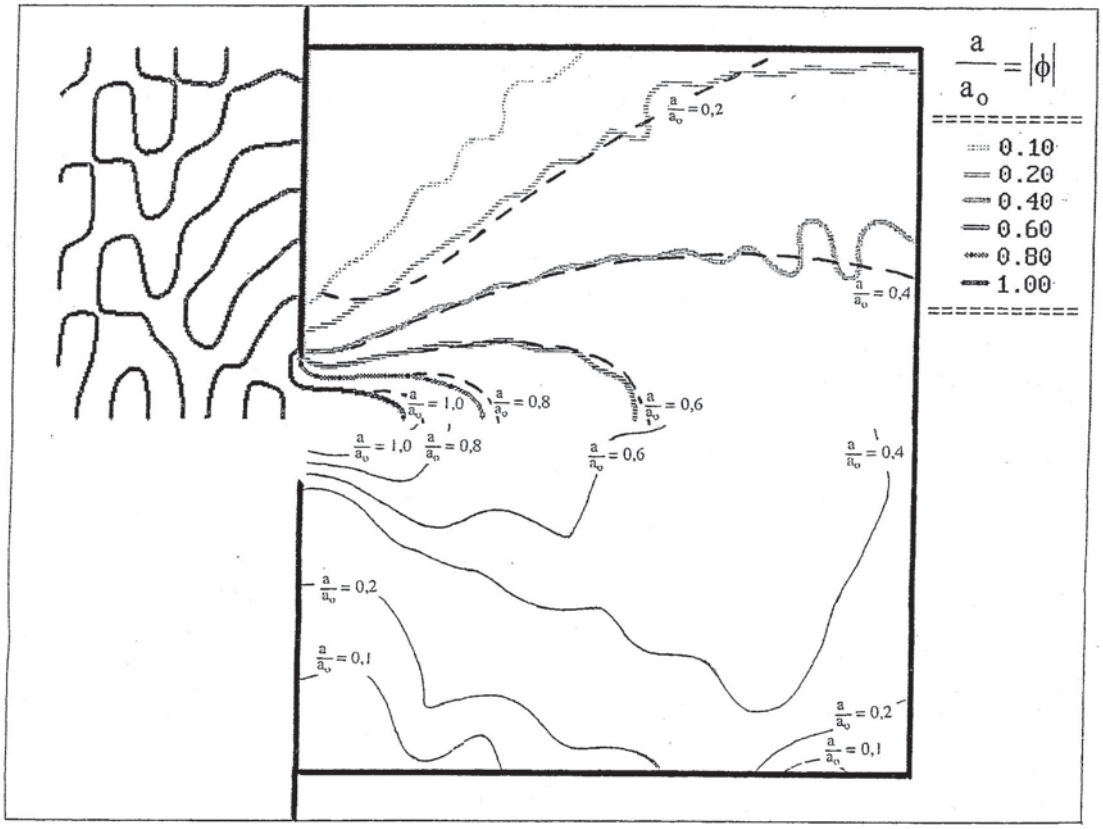


Figure 17 - Agitation dans un bassin entouré de frontières complètement absorbantes.
Moitié supérieure du bassin
En traits continus : d'après notre modèle (Sanchez 1998-B.14).
En traits discontinus : d'après la solution analytique de Blue et Johnson (SPM 1984 *in* B.14).
Moitié inférieure du bassin
En traits continus : d'après les mesures expérimentales de Pos et Kilner (1987 *in* B.14).

Une étude de l'influence du coefficient de réflexion des parois sur l'agitation portuaire a été réalisée ; dans cette étude, l'agitation portuaire est caractérisée par la moyenne quadratique de ϕ dans le bassin. Le tableau III.1 donne cette moyenne quadratique de ϕ pour quelques coefficients K. On observe que pour des faibles valeurs de K, l'agitation n'augmente que très peu lorsque K augmente, mais à partir de K≈0,8 toute petite augmentation du coefficient de réflexion est accompagnée d'une très forte augmentation de l'agitation portuaire.

K	0,00	0,50	0,80	0,90	0,95	1,00
$\sqrt{<\phi^2>}$	0,394	0,455	0,605	0,773	1,029	1,767

Tableau III.1 - Agitation moyenne quadratique en fonction de K.

Il est particulièrement intéressant de montrer le flux d'énergie P* dans un bassin avec des frontières parfaitement réfléchissantes (figure 18). La première observation d'importance

est que le flux d'énergie vers les parois est nul ; ceci étant dû au fait que les parois sont incapables d'absorber de l'énergie. La deuxième observation est que le débit net d'énergie à travers l'accès est nul (l'énergie transmise vers l'intérieur du port sur les côtés de l'accès est compensée par une énergie transmise vers l'extérieur, laquelle se produit sur la partie centrale de l'accès). La troisième observation est que l'énergie circule autour des points amphidromiques et que les sens de la circulation sont inversés entre deux tourbillons d'énergie voisins ; les tourbillons d'énergie transmise forment des carrés ; chaque côté des carrés est égal à une demi-longueur d'onde.

Les simulations numériques de l'agitation ayant montré l'importance de la houle incidente et du coefficient de réflexion des parois, la suite de mes recherches est axée vers la mesure directe de ces paramètres sur le terrain et en laboratoire.

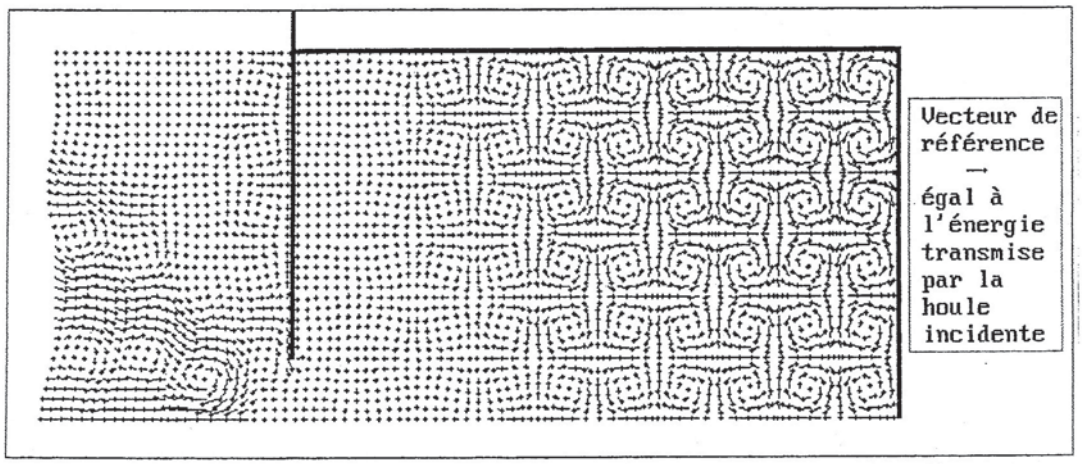


Figure 18 - Distribution du flux d'énergie adimensionnel dans un bassin entouré de frontières parfaitement réfléchissantes (d'après Sanchez 1998-B.14).

APPLICATIONS PRATIQUES DU MODÈLE D'AGITATION PORTUAIRE

Le modèle d'agitation portuaire a été utilisé par les étudiants en 2ème année de la Maîtrise des Sciences et des Techniques de Travaux Publics et Maritimes de l'université de Nantes, dans le cadre des projets de travaux maritimes faisant partie du cursus universitaire. Les sites étudiés sont entre autres : Port Dickson en Malaisie (Sanchez et Grovel 1994-C.6) et le Port d'Argol dans l'île de Hoëdic.

Une application a été réalisée dans le cadre d'un contrat (Sanchez *et al.* 1995-C.9). Il s'agit d'une étude d'agitation dans l'avant-port de Dieppe (figure 19). Auparavant, la gare maritime se trouvait à cet endroit, mais un récent aménagement a permis son installation dans le port extérieur, où la zone d'évitage est plus grande.

Actuellement, un port de plaisance est installé dans cet avant-port. Toutefois, au moment de notre étude, une agitation importante était observée sur le site avec une hauteur significative pour la houle de période de retour 1 an estimée entre 1,00 m et 1,60 m. Le but de notre étude était d'effectuer une recherche phénoménologique du site afin de proposer des solutions permettant d'atténuer l'agitation.

Des visites sur le terrain, la consultation d'autres rapports d'études et les résultats des modélisations numériques, ont permis de dresser un diagnostic expliquant les fortes agitations observées. Ce diagnostic est le suivant (OCIO M., Diffraction d'entrée de port - Agitation dans un bassin - Application au port de Dieppe, *mémoire de DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, 51 p, 1995) :

a) pour une houle de direction nord, les ouvrages portuaires fonctionnent comme un "guide d'onde" provoquant la propagation des vagues jusqu'à l'avant-port,
b) de plus, en conditions de pleine mer, les parois de l'avant-port sont très réfléchissantes, si bien que l'énergie de la houle se dissipe peu et s'accumule dans ce secteur engendrant un phénomène d'agitation bidimensionnel de type stationnaire bien caractérisé car on ne voit plus avancer les crêtes des vagues. Ceci est confirmé par le fait que l'agitation diminue rapidement quand le niveau de la mer descend, soit, quand des voûtes présentes sur les frontières latérales de l'avant-port émergent et rendent les parois moins réfléchissantes.

Des solutions ont été proposées pour atténuer l'agitation (Sanchez *et al.* 1995-C.9).

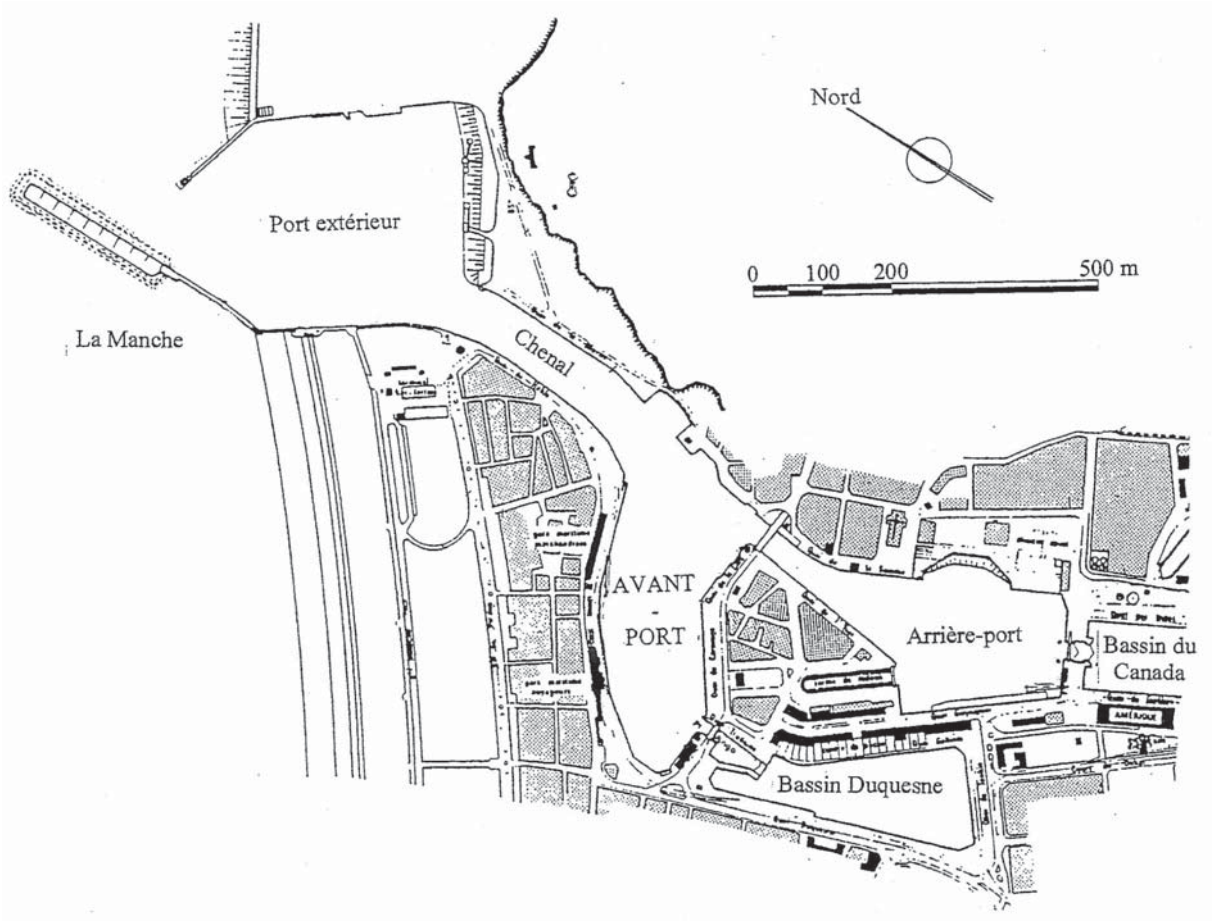


Figure 19 - Plan du port de Dieppe.

MESURE DE LA HOULE EN ZONE CÔTIÈRE

Dans le but de disposer d'un houlographe qui puisse nous permettre de mesurer l'agitation dans un port, j'ai participé à la mise au point d'un prototype de sonde capacitive facile à installer sur le site.

La sonde proprement dite est constituée d'un fil en acier nu et d'un fil électrique commercial recouvert d'une gaine en "Téflon". Ces deux fils sont installés tendus verticalement à une distance d'environ 10 cm l'un de l'autre, à proximité d'une paroi verticale de préférence par facilité pour la mise en place.

Le fil gainé se comporte comme un condensateur dont la capacité augmente avec la longueur d'immersion. La sonde est excitée en imposant une différence de potentiel alternative entre les deux fils qui est donnée par $E=E_m \sin(2\pi ft)$, avec une amplitude de tension $E_m \approx 5V$ et une fréquence $f \approx 50$ kHz. Alors, le courant électrique est proportionnel à la capacité de la sonde et donné par $I=C\, E_m\, 2\pi f \cos(2\pi ft)$.

Un circuit électronique permet de transformer le courant alternatif en différence de potentiel continue. Ce circuit comporte un convertisseur de courant en tension, un redresseur qui permet de transformer les tensions négatives en tensions positives et un filtre passe-bas qui permet d'obtenir une tension continue, mais variable en fonction de la longueur d'immersion de la sonde (figure 20).

Les mesures se font grâce à un ordinateur muni d'une carte d'acquisition analogique-numérique de 12 bits. Les mesures se présentent alors comme des chiffres entiers variant entre 1 et 4096. Pour obtenir le niveau de la mer à partir de ces chiffres, on les multiplie par une constante dont la valeur est déterminée lors du calibrage du système.

Enfin, un logiciel permet de programmer la fréquence d'échantillonnage des niveaux et la durée des mesures.

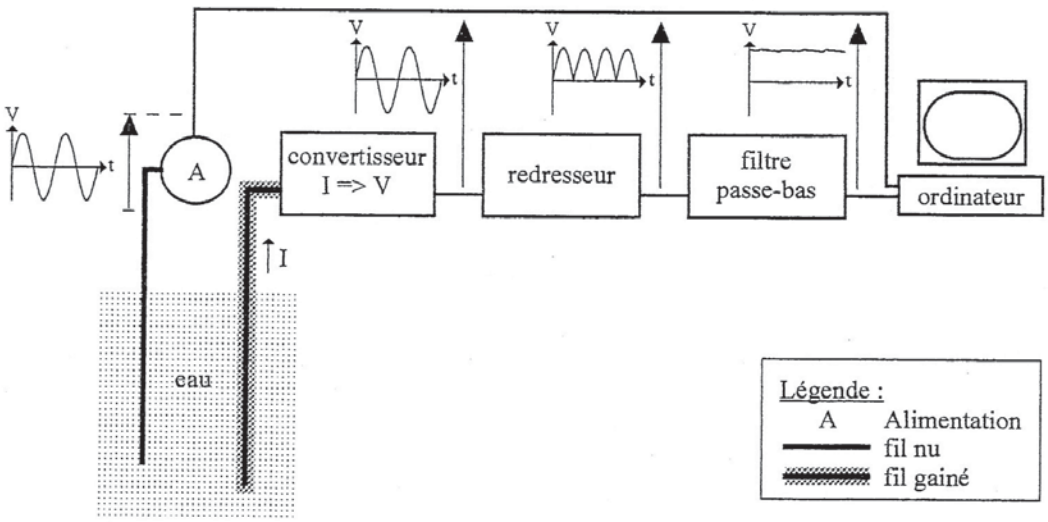


Figure 20 - Schéma illustrant le montage et le circuit électronique d'une sonde capacitive et illustration des tensions observées aux différents étages du circuit.

Les résultats obtenus avec cette sonde capacitive ont été validés lors de deux études différentes. Dans le cadre d'un projet de DEA (Le Foch 1996-DEA.13) l'effet de l'humidité résiduelle sur les mesures a été étudié. On a constaté que lorsque le niveau de la mer descend l'humidité qui reste sur la gaine émergée augmente la capacité de la sonde. Une amélioration a été apportée : l'utilisation d'un fil électrique avec une gaine hydrofuge (en "Téflon").

Au cours de cette recherche, le calibrage de la sonde a été effectué en eau de mer avec des longueurs d'immersion de la sonde statique. Deux enregistrements d'une durée de 20 minutes chacun ont été réalisés à l'extrémité de la jetée de la Pointe de St.-Gildas (Loire-Atlantique).

Dans un premier temps, un traitement des signaux enregistrés a permis de séparer la houle des composantes de longue période supérieures à 25 s, cette opération a supprimé également les effets de la marée sur le signal. Enfin, les enregistrements des niveaux instantanés de la mer ont permis de déterminer le spectre d'énergie, la hauteur de la houle significative et la période liée à la fréquence spectrale pic. Les résultats ont été comparés avec des observations visuelles et validés.

Dans le cadre d'un projet de fin d'études de l'École Navale et Groupe Écoles du Poulmic (Marichy et Pihet 1997-EN.3) une deuxième amélioration a permis de diminuer encore l'effet de l'humidité sur la précision des mesures. En effet, on a démontré que les erreurs liées aux mesures des niveaux sont inversement proportionnelles à la fréquence d'excitation de la sonde, de sorte que pour une fréquence f=50 kHz les erreurs de notre sonde sont toujours inférieures à 0,04 m.

Au cours de cette étude, une campagne de mesures a été réalisée à l'extrémité de la jetée de la pointe de Merquel, au sud de l'embouchure de la Vilaine, en Loire-Atlantique. Le but de cette campagne était de mettre au point une méthodologie de mesure in situ de la direction de propagation d'une houle progressive et de son spectre d'énergie. Trois sondes ont été mises en place formant un triangle. Les résultats obtenus étaient en accord avec des observations visuelles pour la hauteur significative et pour la période, cependant, la direction évaluée, diffère de celle observée de 25° environ.

Une simulation numérique du problème a montré que l'erreur dans la direction de la houle était due au fait que les sondes étaient trop proches lors de la campagne de mesures. On peut envisager d'obtenir des résultats plus précis si le rapport de la distance séparant les sondes sur la longueur d'onde varie entre 0,05 et 0,15 (Sanchez 1998-B.14).

ÉVALUATION DU COEFFICIENT DE RÉFLEXION DES FRONTIÈRES LATÉRALES

Les études de simulation numérique de la propagation de la houle dans un bassin m'ont sensibilisé sur l'importance du phénomène de réflexion dans les problèmes d'agitation portuaire. Le cas de l'avant-port de Dieppe est un exemple remarquable de ce problème. Dans la mesure du possible, les ports devraient être munis de parois absorbantes, surtout sur les frontières où une incidence directe de la houle venant de l'extérieur du port est observée.

La mesure fiable du coefficient de réflexion en laboratoire et in situ est une nécessité pour les ingénieurs qui proposent des solutions pour atténuer l'agitation.

Depuis 1994, je travaille sur l'étude de la réflexion des frontières latérales au domaine maritime soumises à l'action des houles aléatoires. Mes recherches publiées à ce jour concernent exclusivement une incidence frontale. Les méthodes issues de mes travaux peuvent être généralisées pour un angle d'incidence quelconque sur une frontière rectiligne, mais le cas de la réflexion d'une houle multidirectionnelle semble être inabordable avec ces méthodes.

Depuis les années soixante-dix, le nombre des méthodes de mesure du coefficient de réflexion est très abondant. La plupart de ces méthodes sont basées sur les mesures des niveaux en deux points fixes, voire plus. La démarche suivie consiste à séparer les composantes propres aux différentes fréquences par une analyse de Fourier. Ainsi, pour chaque fréquence on peut évaluer l'amplitude de la houle et sa phase en chaque point.

Dans le cas d'une houle unidirectionnelle en incidence perpendiculaire à la paroi, deux sondes sont utilisées pour la mesure de deux amplitudes et d'un déphasage entre les deux signaux, et ceci pour chaque fréquence examinée. Les trois paramètres mesurés permettent le calcul des trois paramètres qui caractérisent la réflexion : l'amplitude de l'onde incidente, l'amplitude de l'onde réfléchie, et le déphasage entre les ondes incidente et réfléchie à la paroi.

D'autres méthodes utilisent trois sondes ou plus pour étudier le même problème d'une houle unidirectionnelle en incidence frontale sur une paroi. Dans ces cas le nombre des paramètres connus est plus important que le nombre des paramètres inconnus. Les paramètres caractérisant la réflexion sont alors évalués à l'aide d'une méthode qui permet de minimiser les erreurs, comme la méthode des moindres carrés par exemple.

Le but de mes recherches n'est pas seulement de mettre au point une méthode d'évaluation des paramètres définissant la réflexion ; de nombreuses autres méthodes donnent de résultats très fiables. Mon intérêt s'est focalisé sur l'utilisation de ces méthodes pour rendre le phénomène de réflexion plus compréhensible.

Je présente par la suite deux méthodes d'étude de la réflexion issues de mes travaux.

- La première méthode, qui est basée sur l'observation des trajectoires des particules d'eau en surface, ne peut être utilisée qu'en canal à houle,
- La deuxième méthode, qui est basée sur l'étude du niveau et de la pente de la surface libre en un point, peut être utilisée en laboratoire et in situ.

Étude de la réflexion à partir de l'observation des trajectoires des particules d'eau en surface

Pour développer cette méthode je me suis inspiré des trajectoires théoriques des particules d'eau en surface dans le cas d'une houle sinusoïdale progressive de faible amplitude évoluant par grandes profondeurs. Pour une houle se propageant vers la droite, ces trajectoires sont circulaires et se développent dans le sens des aiguilles d'une montre (figure 21a).

Dans le cas d'une réflexion unidirectionnelle, à une houle incidente progressive qui se propage vers la droite, par convention, se superpose une houle progressive réfléchie se propageant vers la gauche. Les trajectoires des particules d'eau en surface liées à cette dernière houle sont également circulaires mais elles se développent dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (figure 21b).

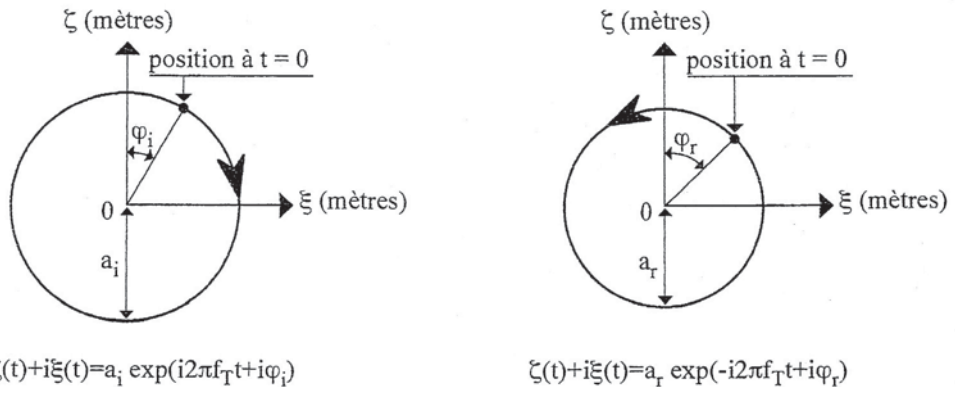


Figure 21 - Orbites des particules d'eau en surface liées à une houle sinusoïdale progressive.
(a) Orbite liée à une houle d'amplitude a_i, de phase initiale φ_i et de fréquence f_T se déplaçant vers la droite.
(b) Orbite liée à une houle d'amplitude a_r, de phase initiale φ_r et de fréquence f_T se déplaçant vers la gauche.

Les trajectoires observées résultent alors de la superposition de ces deux trajectoires élémentaires. Ainsi, si la réflexion est partielle la trajectoire observée est elliptique avec l'axe focal plus ou moins incliné selon la position du point de mesures par rapport aux noeuds et aux ventres d'oscillation. Si la réflexion est parfaite la trajectoire observée est rectiligne (ellipse complètement aplati).

On montre, dans ce qui suit, que les techniques de traitement du signal permettent de séparer les deux trajectoires élémentaires superposées, et donc, de séparer les houles incidente et réfléchie.

Pour développer cette méthode, on doit étudier le mouvement d'une particule d'eau en surface. Si l'on accepte le principe de la superposition linéaire du mouvement, la trajectoire d'une de ces particules, liée à la propagation d'une houle aléatoire se propageant en grandes profondeurs, peut être approchée par les équations paramétriques suivantes :

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{N} \zeta_n(t) = \sum_{n=1}^{N} \left[a_{in} \cos(\omega_n t - k_n x + \varepsilon_n) + a_{rn} \cos(\omega_n t + k_n x + \varepsilon_n - \beta_n) \right] \qquad (27)$$

$$\xi(t) = \sum_{n=1}^{N} \xi_n(t) = \sum_{n=1}^{N} \left[a_{in} \sin(\omega_n t - k_n x + \varepsilon_n) - a_{rn} \sin(\omega_n t + k_n x + \varepsilon_n - \beta_n) \right] \qquad (28)$$

où ζ est la position verticale instantanée de la particule d'eau de surface étudiée (mesurée à partir du niveau au repos de la surface de l'eau, positive vers le haut), ξ la position horizontale de cette même particule (mesurée à partir de sa position moyenne), a_i est l'amplitude de l'onde incidente, a_r l'amplitude de l'onde réfléchie, x la coordonnée horizontale de la position moyenne de la particule d'eau qui est positive vers la droite et d'origine au niveau de la paroi réfléchissante, t le temps, ω la pulsation, k le nombre d'onde, ε la phase initiale de l'onde incidente au niveau de la paroi réfléchissante, β le déphasage entre l'onde incidente et réfléchie au niveau de cette paroi et l'indice n désigne qu'une grandeur est associée à la composante harmonique n et enfin N est le nombre de ces composantes

Alors, pour étudier le mouvement on peut définir une fonction complexe F(t) contenant ζ dans sa partie réelle et ξ dans sa partie imaginaire. Cette fonction est donnée par :

$$F = \zeta + i\xi = \sum_{n=1}^{N} \left\{ a_{in} \exp\left[i(\omega_n t - k_n x + \varepsilon_n) \right] + a_{rn} \exp\left[- i(\omega_n t + k_n x + \varepsilon_n - \beta_n) \right] \right\} \qquad (29)$$

où i est la racine carrée de -1. Les coefficients de Fourier d'un signal F(t) d'une durée τ peuvent être calculés grâce à l'expression suivante :

$$c_n[F] = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} F(t) \exp(-i2\pi n f_\tau t)\, dt \qquad , n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots \qquad (30)$$

où f_τ est la fréquence associée à la période fondamentale du signal ($f_\tau = 1/\tau$) et c_n le coefficient de Fourier de la composante de fréquence $f_n = nf_\tau$ et de pulsation $\omega_n = 2\pi f_n$.

Selon le théorème de Shannon-Nyquist, si le signal F(t) est examiné à l'aide de la transformée de Fourier discrète, alors ce signal est décomposé en $N = \tau/\Delta t/2$ ondes de fréquence positive et même nombre d'ondes de fréquence négative (Δt est le pas de temps d'échantillonnage du signal). La série de Fourier (ou transformée de Fourier discrète) de F(t) est donnée par :

$$F = \sum_{n=1}^{N} \left\{ |c_n| \exp\left[i\omega_n t + i \arg(c_n) \right] + |c_{-n}| \exp\left[- i\omega_n t + i \arg(c_{-n}) \right] \right\} \qquad (31)$$

Ainsi, chaque coefficient de Fourier de fréquence positive f_n représente une trajectoire circulaire se développant dans le sens des aiguilles d'une montre dans le plan ξ-ζ et son amplitude correspond donc à l'amplitude d'une composante de la houle incidente (Sanchez 1999-A.8). De plus, les amplitudes des coefficients de Fourier de fréquence négative f_{-n} correspondent aux amplitudes des composantes de la houle réfléchie.

A partir des équations (29) et (31) on peut identifier l'amplitude de l'onde incidente et celle de l'onde réfléchie pour chaque composante n de fréquence f_n. Ces amplitudes sont respectivement :

$$a_{in} = |c_n| \qquad (32)$$

$$a_{rn} = |c_{-n}| \qquad (33)$$

et l'angle de phase β_n lié à la réflexion de la énième composante de la houle est :

$$\beta_n = \arg(c_n) + \arg(c_{-n}) + 2k_n x + 2\pi m_n \qquad (34)$$

où m_n est un entier positif ou négatif arbitraire justifié par le fait que l'angle de phase est défini à plus ou moins un multiple de 2π.

En profondeurs intermédiaires et faibles, la cinématique des particules d'eau est plus compliquée que celle décrite précédemment et la méthode de séparation des houles incidente et réfléchie, telle qu'elle est présentée ci-dessus n'est plus valable. En effet, la trajectoire d'une particule d'eau en surface liée à la propagation d'une onde purement progressive, devient elliptique avec l'axe focal horizontal, de sorte que l'équation (28) ne s'applique plus. Dans ce cas l'expression du mouvement horizontal est :

$$\xi(t) = \sum_{n=1}^{N} \xi_n(t) = \sum_{n=1}^{N} \left\{ \frac{1}{\tanh(k_n d)} \left[a_{in} \sin(\omega_n t - k_n x + \varepsilon_n) - a_{rn} \sin(\omega_n t + k_n x + \varepsilon_n - \beta_n) \right] \right\} \qquad (35)$$

Cette méthode peut également être utilisée pour l'étude de la réflexion en profondeurs intermédiaires et faibles, grâce à une multiplication par un facteur de réduction $\tanh(k_n d)$ de chacune des composantes harmoniques de l'expression (35). Ceci est possible en utilisant des techniques du traitement du signal qui permettent de décomposer le signal ξ dans une somme de composantes harmoniques.

Dans le cadre d'une recherche de DEA (Le Moal 1996-DEA.14) une série de mesures en canal à houle ont permis d'étudier les possibilités de cette méthode. Au cours de cette recherche 4 essais ont été réalisés avec des houles régulières de période 2 s.

La figure 22 montre la trajectoire d'un flotteur enregistré par des moyens vidéo lors de l'un de ces essais. Cette trajectoire résulte de la superposition des houles incidente et réfléchie à proximité d'une paroi partiellement absorbante, par une profondeur de 0,25 m. La figure 23 montre les amplitudes de l'onde incidente et de l'onde réfléchie obtenues par la méthode présentée en tenant compte de l'aplatissement de la trajectoire dû à une profondeur finie dans le canal lors de l'essai.

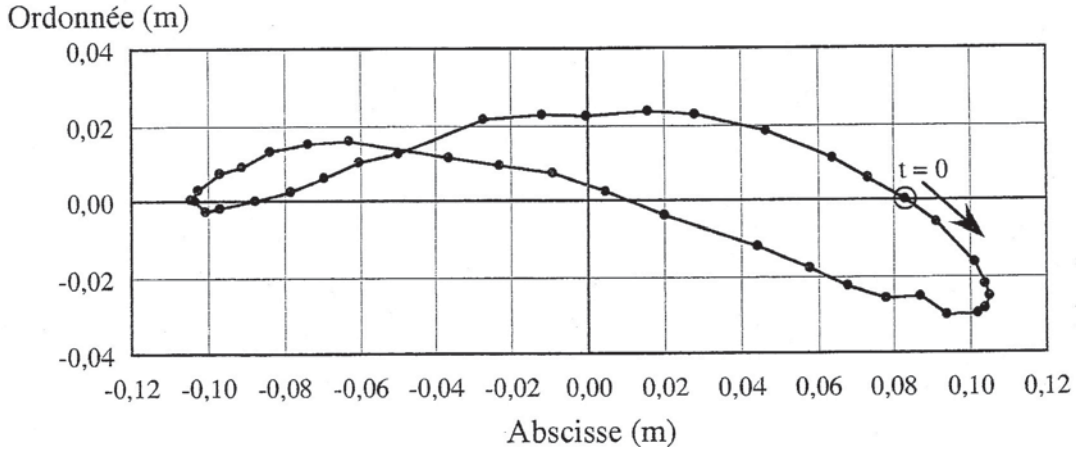


Figure 22 - Trajectoire d'une particule d'eau en surface observée en laboratoire (d'après Le Moal 1996-DEA.14)

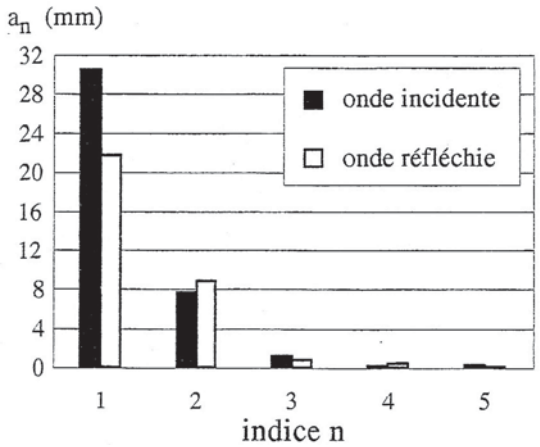


Figure 23 - Amplitudes des ondes incidente et réfléchie liées à la trajectoire de la figure 23 (d'après Sanchez 1998-B.14)

Une analyse critique de cette méthode nous montre qu'elle présente des déficiences d'ordre pratique et théorique.

- Du point de vue pratique, un flotteur a tendance à se déplacer dans le sens de la propagation de la houle. Le problème lié à ce déplacement n'est pas tant la vitesse résiduelle, car celle-ci n'étant pas périodique, l'analyse de Fourier permet de corriger facilement cet effet, mais ce déplacement rend très difficile l'évaluation de la phase β liée à la réflexion car le déphasage entre l'onde incidente et réfléchie varie lorsque le flotteur dérive (la position "moyenne" du flotteur varie avec le temps).
- Du point de vue théorique, les expressions paramétriques du mouvement correspondent à une théorie de la houle développée seulement au premier ordre d'approximation.

Malgré ces déficiences, cette méthode donne un très bon aperçu qualitatif du problème de réflexion car on constate que les orbites sont de plus en plus aplaties quand la réflexion augmente.

ÉTUDE DE LA RÉFLEXION À PARTIR DES MESURES DES NIVEAUX ET DES PENTES DE LA SURFACE LIBRE DE L'EAU

Les avantages de cette méthode sont qu'elle peut être mise en place facilement et que ses déficiences d'ordre théorique sont minimes. Dans cette méthode on étudie en un point fixe, l'oscillation verticale et la pente de la surface libre, liées à la propagation d'une houle aléatoire dans un canal à houle en présence de la réflexion.

Par convention, dans cette méthode x est la coordonnée horizontale mesurée dans un canal à houle, ayant pour origine le point d'intersection entre la paroi réfléchissante (située à droite du canal) et la surface libre de l'eau au repos et orientée vers l'extérieur de ce canal.

On considère que le niveau de la surface libre de l'eau résulte de la superposition d'un certain nombre d'ondes élémentaires incidentes et réfléchies. Le niveau η de la surface libre de l'eau en un point fixe arbitraire x en face de la paroi réfléchissante est alors donné par :

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{N} \eta_n(t) = \sum_{n=1}^{N} \left[a_{in} \cos(\omega_n t - k_n x + \varepsilon_n) + a_{rn} \cos(\omega_n t + k_n x + \varepsilon_n - \beta_n) \right] \qquad (36)$$

Si pour chaque n une fonction $\chi_n(t)$ est définie comme suit :

$$\chi_n = \frac{\partial \eta_n}{\partial k_n x} \qquad (37)$$

alors, on peut également définir une fonction complexe F(t) qui au point x est donnée par :

$$F = \eta + i\chi = \sum_{n=1}^{N} \eta_n + i \sum_{n=1}^{N} \chi_n = \sum_{n=1}^{N} \left\{ a_{in} \exp\left[i(\omega_n t - k_n x + \varepsilon_n) \right] + a_{rn} \exp\left[-i(\omega_n t + k_n x + \varepsilon_n - \beta_n) \right] \right\} \qquad (38)$$

Les coefficients de la transformée discrète de Fourier d'un signal F(t) d'une durée τ sont donnés par l'équation 30. Si le pas de temps d'échantillonnage est Δt, on obtient une série de Fourier donnée par l'équation 31 avec $N=\tau/\Delta t/2$. Alors pour chaque fréquence $f_n=nf_\tau=n/\tau$, l'amplitude de l'onde incidente est donnée par l'équation 32, l'amplitude de l'onde réfléchie par l'équation 33, et le déphasage entre l'onde incidente et réfléchie en x=0 par l'équation 34 (Sanchez 1999-A.8).

Le signal complexe F(t) peut être reconstitué en utilisant trois sondes rapprochées situées sur l'axe central d'un canal à houle, la sonde 1 située en x-Δx/2, la sonde 2 en x et la sonde 3 en x+Δx/2. Alors, la partie réelle de F(t) est donnée par :

$$\eta = \sum_{n=1}^{N} \eta_n = h_2(t) \tag{39}$$

où h_1, h_2 et h_3 sont les niveaux de la surface libre de l'eau mesurés par les sondes 1, 2 et 3, respectivement. La partie imaginaire de F(t) peut être calculée sans erreur d'ordre théorique par l'expression suivante (Sanchez 2000-A.8) :

$$\chi = \sum_{n=1}^{N} \chi_n = \sum_{n=1}^{N} \frac{\partial \eta_n}{\partial k_n x} = \sum_{n=1}^{N} \frac{r_n}{k_n} \frac{h_{3n}(t) - h_{1n}(t)}{\Delta x} \tag{40}$$

où h_{1n}, et h_{3n} sont les niveaux de la surface libre de l'eau dus à l'énième composante de la houle aux emplacements des sondes 1 et 3, respectivement (ces niveaux sont inconnus a priori) et r_n est un facteur de correction obtenu par un développement en séries de Taylor pour décrire les niveaux au voisinage de x (Sanchez 2000-A.8). L'expression de r_n est :

$$r_n = \frac{k_n \Delta x / 2}{\sin(k_n \Delta x / 2)} \tag{41}$$

Il est toujours possible d'obtenir la partie imaginaire de F(t) en suivant une méthodologie composée des étapes suivantes : d'abord, les coefficients de Fourier c_n du signal réel $\partial\eta/\partial x=(h_3(t)-h_1(t))/\Delta x$ sont déterminés, ensuite, chaque coefficient de Fourier est multiplié par r_n/k_n, et finalement, la transformée de Fourier inverse est appliquée aux coefficients c_n pour obtenir la partie imaginaire de F(t). Cette méthodologie est illustrée à la figure 24, où DFT désigne la transformée de Fourier discrète et IDFT la transformée de Fourier inverse discrète.

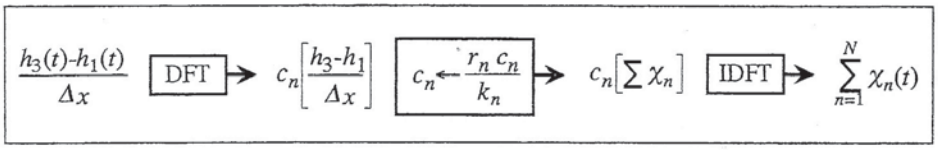


Figure 24 - Détermination de la partie imaginaire de F(t) à partir de $h_1(t)$ et $h_3(t)$ grâce à la transformée de Fourier discrète.

Dans le but d'étudier les erreurs associées aux positions des sondes, trois paramètres sans dimension sont utilisés : $\Delta x°=\Delta x/L_n$, $x°=x/L_n$ et $\Delta t°=\Delta t/T_n$ (où T_n est la période de la énième composante de la houle $T_n=f_n^{-1}$). Dans cette étude, le paramètre $\Delta t°$ est fixé à 1/32. Des simulations numériques permettent d'étudier les erreurs de cette méthode en fonction de $\Delta x°$, de x° et du coefficient de réflexion $K_n=a_{rn}/a_{in}$. L'erreur propre aux coefficients de réflexion calculés est définie par :

$$EK_{cn} = \left| K_{cn} - K_n \right| \tag{42}$$

où K_{cn} est le coefficient de réflexion calculé à la fréquence nf_τ ($K_{cn}=|c_{-n}|/|c_n|$). Les simulations numériques ont montré que les erreurs EK_{cn} étaient toujours nulles pour $\Delta x°<0.50$ quelles que soient les valeurs de x° et de K_n.

En fait, si l'on accepte la validité du principe de superposition linéaire du mouvement, les erreurs dans l'estimation de la réflexion sont liées exclusivement aux incertitudes des mesures (erreurs des sondes). On a montré que si l'erreur relative des mesures est inférieure à 0,01, l'erreur dans l'évaluation de K_{cn} est toujours inférieure à 0,04 pour $0,04<\Delta x/L_n<0,50$ quelles que soient les valeurs de x° et de K_n. Cette erreur qui correspond à un coefficient de réflexion théorique nul, diminue lorsque ce coefficient augmente (Sanchez 2000-A.8).

EFFETS LIÉS AUX PROFONDEURS FAIBLES ET INTERMÉDIAIRES

Une caractéristique importante du spectre d'énergie $S(f=nf_\tau)=c_n^2/f_\tau$ de $F(t)=\eta+i\chi$ pour une houle complètement formée se propageant en profondeurs infinies est qu'un maximum d'énergie est observé pour une fréquence pic f_p et que l'énergie est principalement contenue entre deux fréquences f_{min} et f_{max} (figure 25a) (Pierson et Moskowitz 1964 *in* DEA.8, Hasselmann *et al.* 1976 *in* A.8).

Quand une houle réelle générée en grandes profondeurs se propage vers les profondeurs intermédiaires et faibles, des composantes de deuxième ordre et supérieurs deviennent visibles dans le spectre d'énergie (figure 25b). Les fréquences et les nombres d'onde de ces composantes sont des multiples des mêmes paramètres liés aux composantes de premier ordre. L'importance des composantes d'ordre secondaire augmente quand la profondeur diminue.

La réflexion d'une houle aléatoire incidente (caractérisée par les composantes de fréquence positive de S(f) selon notre méthode d'analyse) en profondeurs intermédiaires ou faibles, génère une houle réfléchie aléatoire (caractérisée par les composantes de fréquence négative de S(f)) comme il est montré sur la figure 25c. En général, le rapport $K_{cn}=|c_{-n}|/|c_n|$ n'est pas le même pour tout n.

Si une houle aléatoire à bande de fréquences étroite ($f_{max}<2f_{min}$) se propage dans un canal à houle à partir des grandes profondeurs, alors, les composantes d'ordre secondaire qui apparaissent quand la profondeur diminue n'interfèrent pas avec les composantes de premier ordre. Dans ce cas, la méthode d'évaluation de la réflexion présentée ci-dessus peut être utilisée si ω_n est relié à k_n de la façon suivante :

a) par la relation linéaire de dispersion (équation 19), pour les fréquences du lobe principal autour de la fréquence spectrale pic.
b) par la relation de deuxième ordre $\omega^2=2gk\tanh(kd/2)$, pour les fréquences du lobe contenant la fréquence $2f_p$.
c) et la relation de émième ordre $\omega^2=mgk\tanh(kd/m)$, pour les fréquences du lobe contenant la fréquence mf_p.

Dans la pratique, si les erreurs propres aux sondes sont inférieures à 1% et si L_{fp} représente la longueur d'onde associée à la fréquence spectrale pic f_p, des mesures en utilisant 3 sondes disposées en accord avec ce qui est préconisé par la méthode d'évaluation de la réflexion avec $\Delta x=0,1L_{fp}$, permettent d'évaluer les coefficients de réflexion pour toutes les composantes dont la longueur d'onde est comprise entre $0,4L_{fp}$ et $5,0L_{fp}$, et ceci avec une erreur absolue inférieure à 0,04 dans tous les cas (quelles que soient les valeurs de x et de K_n).

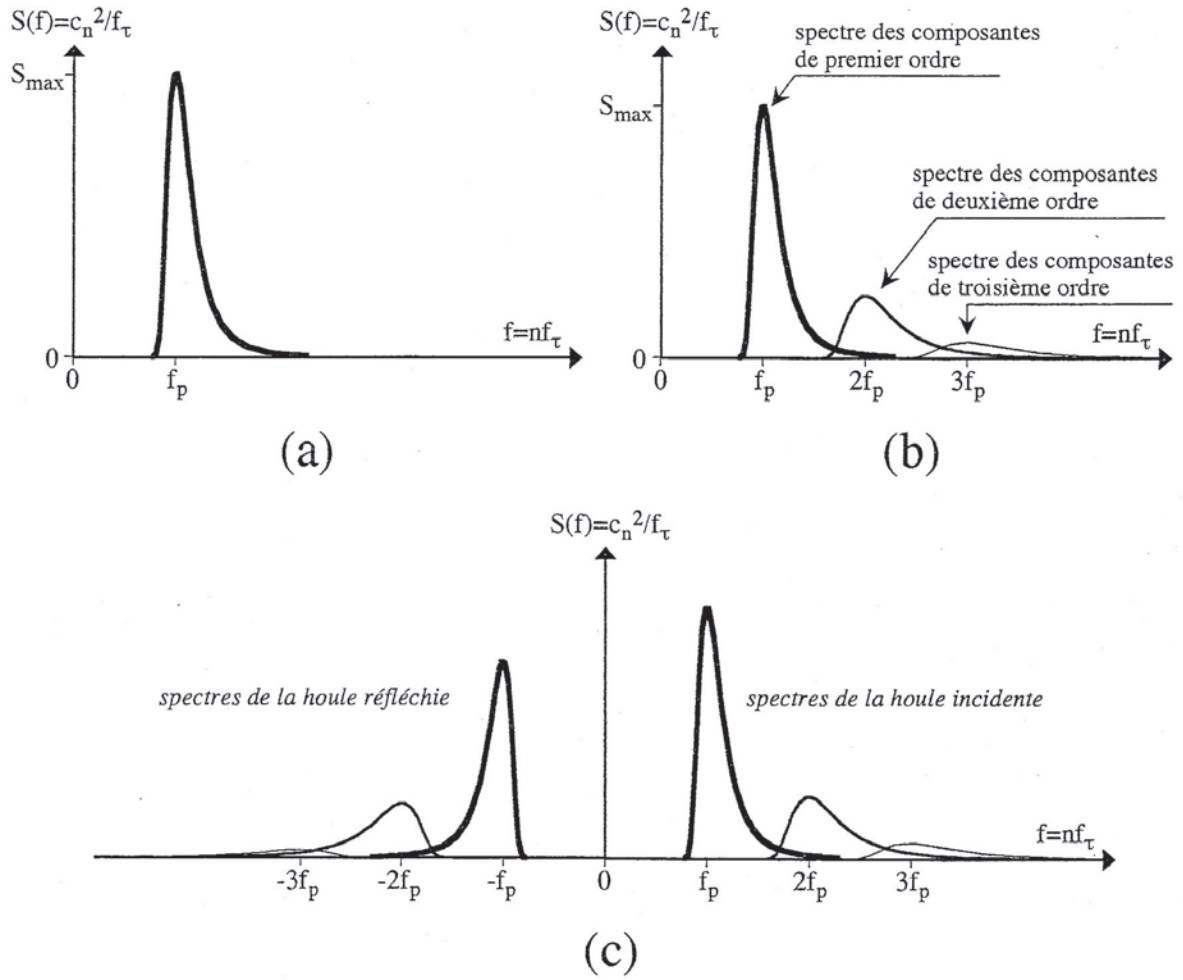


Figure 25 - Illustration d'un spectre d'énergie de F(t) typique correspondant à une mer complètement formée.

(a) Pour une houle progressive évoluant par grandes profondeurs.

(b) Pour une houle progressive évoluant par profondeurs intermédiaires ou faibles.

(c) Pour une houle évoluant par profondeurs intermédiaires ou faibles, à proximité d'une paroi réfléchissante (superposition des houles incidente et réfléchie).

MESURES DE LA RÉFLEXION EN CANAL À HOULE

La méthode de séparation de deux ondes croisées se propageant selon deux directions contraires a été validée en laboratoire grâce à deux séries de tests réalisées dans le canal à houle de l'université de Caen.

Ce canal a une longueur de 22 m, une largeur de 0,80 m et une profondeur maximale de 1,00 m. Un générateur de houle aléatoire non réfléchissant est situé à l'extrémité gauche de ce canal. Les niveaux de la surface libre de l'eau sont mesurés avec des sondes résistives pilotées par un ordinateur. Chaque sonde a un circuit indépendant et fonctionne dans une fréquence différente des autres, ce qui évite toute interférence entre les sondes, même si elles sont très proches. L'erreur relative des mesures avec ces sondes est d'environ 1%.

La première série d'essais a permis d'étudier le cas d'une faible réflexion due à une plage rigide de pente faible. La deuxième série concerne un brise-lames immergé qui réfléchit et transmet la houle incidente. Dans les deux cas, des houles sinusoïdales et aléatoires sont examinées.

Pour chaque essai, les niveaux de la surface de l'eau sont échantillonnés à une fréquence de 16 Hz sur une durée totale de 64 s, ce qui donne un total de 2N=1024 mesures par sonde.

Réflexion due à une plage rigide de pente faible

Dans le but d'étudier une faible réflexion, une plage rigide d'une pente de 1/20 a été placée dans la partie à droite du canal à houle pour provoquer le déferlement des vagues. Dans le reste du canal la profondeur est constante et égale à 0,40 m. Trois sondes ont été placées dans la partie centrale du canal. La distance entre les sondes 1 et 3 est toujours donnée par $\Delta x=0{,}1L_{f_p}$ (la sonde 2 est placée au milieu).

Dans cette série, 26 essais ont été réalisés avec des houles périodiques et 2 essais avec des houles aléatoires (spectre d'énergie de $\eta(t)$ de Pierson-Moskowitz). Pour chaque essai, une cambrure γ de référence a été évaluée en fonction de la hauteur moyenne quadratique de la houle incidente ; cette hauteur a été retenue car elle peut caractériser aussi bien une houle périodique qu'une houle aléatoire. La cambrure est calculée par l'équation ci-dessous :

$$\gamma = \frac{H_{rms\text{-}i}}{L_{f_p}} \quad \text{, avec :} \quad H_{rms\text{-}i} = 2\left[\int_0^{\infty} S(f)\,df\right]^{1/2} = 2\left[\sum_{n=1}^{N} c_n{}^2\right]^{1/2} = 2\left[\sum_{n=1}^{N} a_{in}{}^2\right]^{1/2} \qquad (43)$$

où $H_{rms\text{-}i}$ est la hauteur moyenne quadratique de la houle incidente au point central de mesures (point de vue énergétique) qui est égale à la hauteur de houle significative (spectrale) divisée par $2^{1/2}$, S est le spectre d'énergie de F(t) (et non pas de $\eta(t)$) au point x, et L_{f_p} représente la longueur d'onde associée à la fréquence spectrale pic f_p au même point.

Dans le but de comparer les résultats avec ceux de deux autres méthodes (Goda et Suzuki 1976-A.8, Mansard et Funke 1980-A.8) un coefficient de réflexion moyen est calculé avec la formule habituelle ci-dessous :

$$\overline{K} = \frac{H_{rms\text{-}r}}{H_{rms\text{-}i}} \quad \text{, avec :} \quad H_{rms\text{-}r} = 2\left[\int_{-\infty}^{0} S(f)\,df\right]^{1/2} = 2\left[\sum_{n=1}^{N} c_{-n}{}^2\right]^{1/2} = 2\left[\sum_{n=1}^{N} a_{rn}{}^2\right]^{1/2} \qquad (44)$$

où $H_{rms\text{-}r}$ est la hauteur moyenne quadratique de la houle réfléchie au point central des mesures (en x). Les résultats obtenus par l'analyse de ces essais sont récapitulés au tableau III.2. Pour les méthodes de Goda et Suzuki, deux sondes séparées d'une distance $0.1L_{f_p}$ ont été utilisées. Pour la méthode de Mansard et Funke, trois sondes ont été utilisées : la distance entre les sondes 1 et 2 était de $0.1L_{f_p}$ et celle entre les sondes 2 et 3 de $0.15L_{f_p}$.

La figure 26 montre les valeurs des coefficients de réflexion moyens $\overline{K}$ évalués par la transformée discrète de Fourier de la fonction complexe $F(t)=\eta(t)+i\chi(t)$ et par les deux autres méthodes citées précédemment. Les valeurs de $\overline{K}$ évaluées par l'analyse de F(t) varient entre 0,032 et 0,110 et sont pratiquement indépendantes de la cambrure dans le domaine $0{,}014<\gamma<0{,}060$.

n° de l'essai	houle incidente théorique	f_p (Hz)	L_{fp} (m)	$H_{rms\text{-}i}$ (m)	γ	K		
						analyse de F=η+iχ	Goda et Suzuki	Mansard et Funke
1	régulière	0.455	4.13	0.064	0.0155	0.033	0.137	0.133
2	régulière	0.455	4.13	0.084	0.0202	0.055	0.139	0.149
3	régulière	0.455	4.13	0.104	0.0252	0.062	0.117	0.146
4	régulière	0.455	4.13	0.123	0.0299	0.068	0.141	0.186
5	régulière	0.455	4.13	0.141	0.0342	0.065	0.075	0.213
6	régulière	0.455	4.13	0.150	0.0363	0.074	0.098	0.227
7	régulière	0.500	3.69	0.069	0.0186	0.052	0.052	0.062
8	régulière	0.500	3.69	0.091	0.0246	0.041	0.049	0.059
9	régulière	0.500	3.69	0.113	0.0306	0.047	0.060	0.070
10	régulière	0.500	3.69	0.134	0.0364	0.062	0.072	0.081
11	régulière	0.500	3.69	0.155	0.0419	0.062	0.075	0.076
12	irrégulière	0.500	3.69	0.058	0.0158	0.111	0.085	0.137
13	irrégulière	0.500	3.69	0.083	0.0225	0.117	0.086	0.144
14	régulière	0.556	3.22	0.048	0.0150	0.074	0.068	0.093
15	régulière	0.556	3.22	0.075	0.0231	0.082	0.062	0.124
16	régulière	0.556	3.22	0.099	0.0308	0.056	0.108	0.152
17	régulière	0.556	3.22	0.122	0.0380	0.039	0.108	0.195
18	régulière	0.556	3.22	0.134	0.0416	0.081	0.085	0.232
19	régulière	0.556	3.22	0.143	0.0443	0.041	0.137	0.268
20	régulière	0.556	3.22	0.154	0.0480	0.092	0.153	0.283
21	régulière	0.556	3.22	0.165	0.0513	0.043	0.133	0.215
22	régulière	0.667	2.59	0.040	0.0153	0.102	0.118	0.080
23	régulière	0.667	2.59	0.073	0.0280	0.100	0.112	0.115
24	régulière	0.667	2.59	0.090	0.0347	0.111	0.152	0.145
25	régulière	0.667	2.59	0.107	0.0412	0.090	0.110	0.135
26	régulière	0.667	2.59	0.124	0.0480	0.090	0.140	0.146
27	régulière	0.667	2.59	0.140	0.0542	0.074	0.161	0.180
28	régulière	0.667	2.59	0.157	0.0605	0.087	0.107	0.164

Tableau III.2 - Récapitulation des tests réalisés en laboratoire avec une frontière peu réfléchissante.

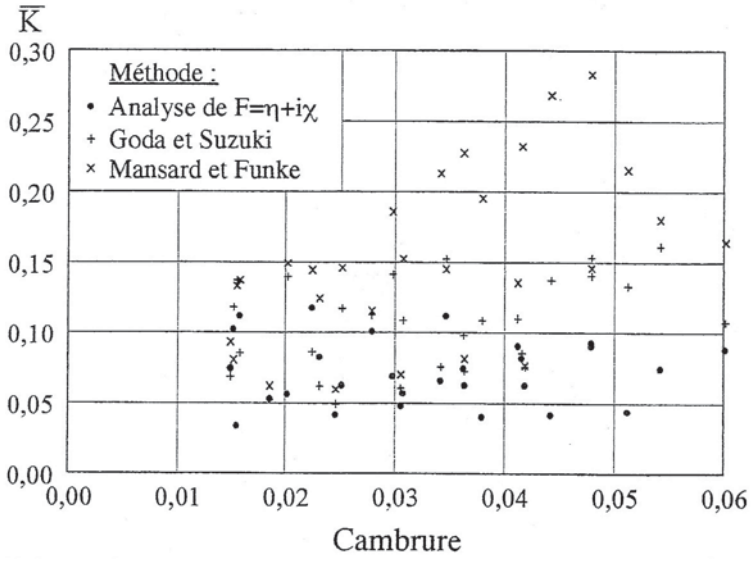


Figure 26 - Coefficients de réflexion moyens déterminés par l'analyse de la fonction complexe F(t)=η(t)+iχ(t), et par les méthodes de Goda et Suzuki et de Mansard et Funke, en fonction de la cambrure de référence de la houle incidente.

La figure 27a montre la trajectoire dans le plan χ-η correspondant à l'essai n° 10 (houle régulière d'une fréquence fondamentale de 0,5 Hz) ; la dissymétrie de cette trajectoire périodique confirme la présence de composantes d'ordre secondaire qui se traduit par une localisation du niveau équidistant entre crête et creux situé au-dessus du niveau de repos. La figure 27b montre les amplitudes des coefficients de Fourier obtenues par l'analyse de la trajectoire montrée à la figure 27a. On constate que le coefficient de réflexion n'est pas le même pour tout n. Ainsi, la houle réfléchie, qui est caractérisée par les composantes de fréquence négative, comporte une composante de deuxième ordre ayant une amplitude plus grande que celle de sa composante de premier ordre.

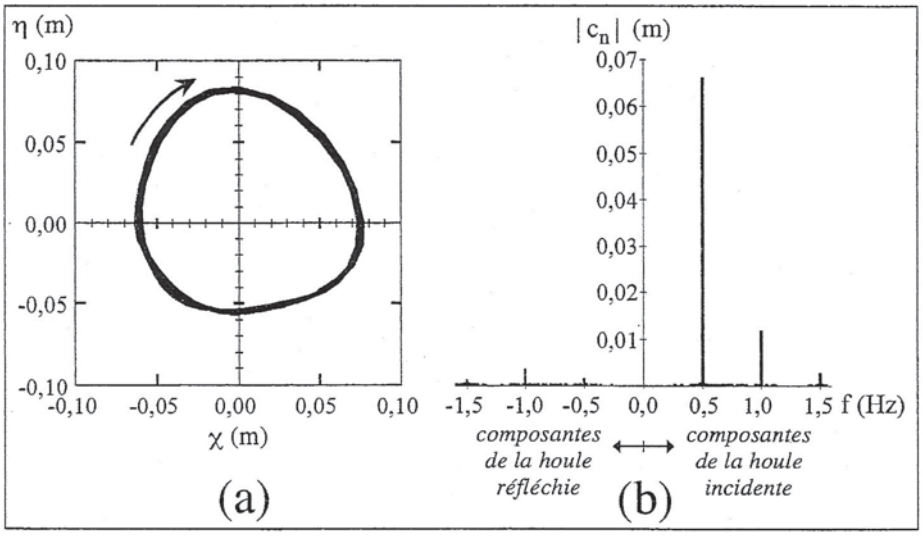


Figure 27 - Résultats correspondant à l'essai n° 10
(houle régulière avec une fréquence fondamentale de 0,5 Hz).
(a) Trajectoire dans le plan χ-η. (b) Amplitudes des coefficients de Fourier de F=η+iχ.

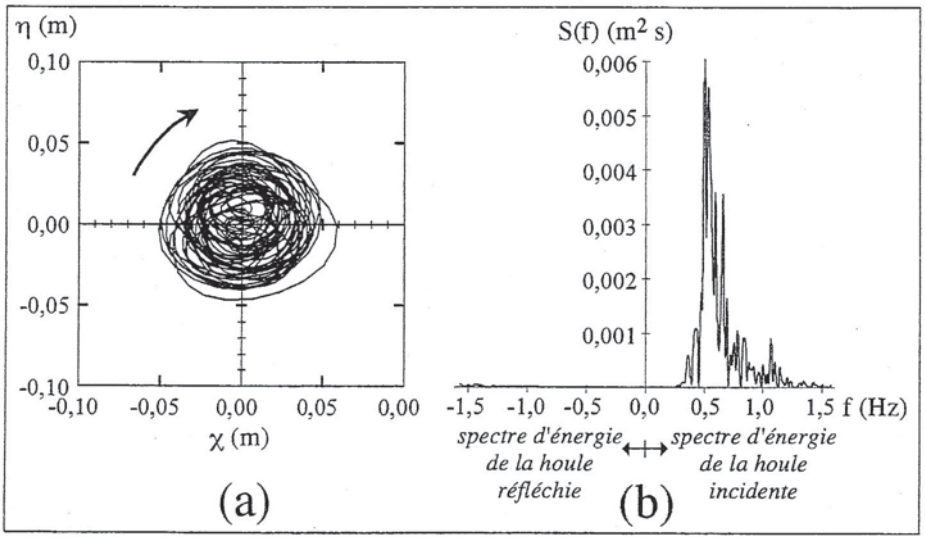


Figure 28 - Résultats correspondant à l'essai n° 12
(houle irrégulière avec une fréquence spectral pic de 0,5 Hz).
(a) Trajectoire dans le plan χ-η. (b) Spectre d'énergie de F=η+iχ.

La figure 28 montre la trajectoire dans le plan χ-η pour l'essai n° 12 (houle irrégulière avec une fréquence spectrale pic de 0,5 Hz) et le spectre d'énergie de $F=\eta+i\chi$ correspondant. Malgré le mouvement très irrégulier dans le plan χ-η observé lors de cet essai, la transformée discrète de Fourier de F(t) permet d'obtenir un coefficient de réflexion $\overline{K}$ proche de ceux évalués pour les houles régulières de même cambrure.

Réflexion et transmission à travers un brise-lames immergé

Dans le but d'examiner la méthode de séparation de deux houles progressives se propageant en sens contraire qui a été présentée préalablement, on a réalisé une étude expérimentale sur la décomposition d'une houle incidente par un brise-lames immergé. Cette structure est symétrique avec une largeur de crête de 0,20 m, une hauteur de 0,40 m par rapport au fond et des talus ayant une pente de 75% ; elle est située à 6,23 m d'un amortisseur de houle placé à l'extrémité droite du canal (figure 29).

Dans cette série, 7 essais ont été réalisés avec des houles périodiques de fréquence fondamentale f_T=0,5 Hz et 9 essais avec des houles aléatoires de fréquence spectrale pic f_p=0,5 Hz (spectres d'énergie de $\eta(t)$ de Pierson-Moskowitz et JONSWAP). Tous les essais ont été effectués avec une profondeur de 0,50 m. Deux arrangements de 3 sondes ont été choisis et chacun a été placé de part et d'autre du brise-lames (figure 29). Dans chaque arrangement, la distance entre les sondes 1 et 3 est Δx=0,40 m, ce qui représente 0,0987 fois la longueur d'onde L_{f_p} théorique.

Chaque arrangement de sondes permet de séparer, au point central de mesures, les houles qui se propagent vers la droite et vers la gauche. Ainsi, l'arrangement A qui est situé en face de la structure, permet d'obtenir la houle incidente se propageant vers la droite (composantes de fréquences positives) et la houle réfléchie par la structure se propageant dans le sens contraire (composantes de fréquences négatives). L'arrangement B qui est situé derrière la structure immergée, permet de déterminer la houle transmise à travers cette structure qui se propage vers la droite (composantes de fréquences positives) et la houle réfléchie par l'amortisseur situé à l'extrémité droite du canal (composantes de fréquences négatives). Les résultats de cette série de tests sont récapitulés au tableau III.3.

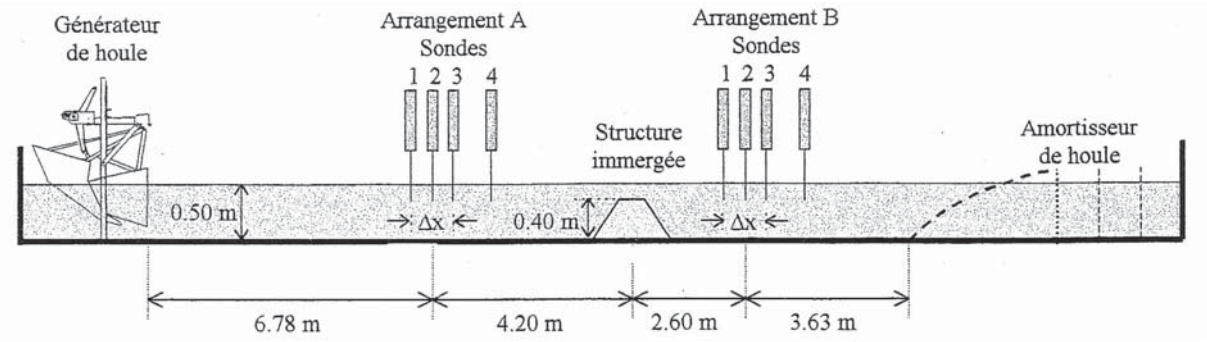


Figure 29 - Illustration de l'installation d'un brise-lames immergé dans le canal à houle de l'université de Caen.

n° de l'essai	Houle incidente théorique	H_{rms-i} (m)	En face de la structure		Derrière la structure		Puissance dissipée D (Watt m^{-1})
			P_A^+ (Watt m^{-1})	P_A^- (Watt m^{-1})	P_B^+ (Watt m^{-1})	P_B^- (Watt m^{-1})	
1	régulière	+0.021	+0.914	-0.208	+0.743	-0.057	+0.020
2	régulière	+0.042	+3.706	-0.877	+3.012	-0.304	+0.121
3	régulière	+0.063	+8.334	-1.825	+6.445	-0.387	+0.451
4	régulière	+0.084	+15.000	-3.139	+9.837	-0.488	+2.512
5	régulière	+0.106	+23.817	-5.050	+12.560	-0.484	+6.691
6	régulière	+0.129	+34.802	-7.790	+16.578	-0.430	+10.864
7	régulière	+0.151	+48.080	-10.584	+20.879	-0.460	+17.077
8	Pierson-Moskowitz	+0.030	+1.736	-0.322	+1.423	-0.106	+0.097
9	Pierson-Moskowitz	+0.059	+6.921	-1.040	+4.688	-0.281	+1.474
10	Pierson-Moskowitz	+0.087	+15.218	-2.149	+7.736	-0.369	+5.702
11	JONSWAP (γ=3)	+0.021	+0.930	-0.204	+0.742	-0.051	+0.035
12	JONSWAP (γ=3)	+0.042	+3.648	-0.745	+3.011	-0.203	+0.095
13	JONSWAP (γ=5)	+0.037	+2.845	-0.601	+2.339	-0.176	+0.081
14	JONSWAP (γ=5)	+0.059	+7.268	-1.328	+4.950	-0.321	+1.311
15	JONSWAP (γ=5)	+0.089	+16.253	-2.558	+8.471	-0.440	+5.664
16	JONSWAP (γ=5)	+0.103	+21.871	-3.390	+10.483	-0.501	+8.499

Tableau III.2 - Récapitulation des essais réalisés en canal à houle en présence d'un brise-lames immergé.

Les figures 30 et 31 montrent, pour les arrangements de sondes A et B, les trajectoires dans le plan χ-η et les amplitudes des coefficients de Fourier de $\eta+i\chi$ correspondant respectivement aux essais n° 2 (H_{rms-i}=0,042 m) et n° 6 (H_{rms-i}=0,042 m). Les houles incidente et réfléchie (par la structure immergée) comportent peu d'énergie dans les composantes d'ordre secondaire, tandis que la houle transmise (à travers la structure immergée) a des composantes d'ordre secondaire relativement importantes. En fait, le mouvement en face du brise-lames est assez régulier et celui observé derrière cette structure est très perturbé par les composantes d'ordre secondaire.

Les puissances ou énergies transmises par les houles progressives se propageant vers la droite P^+ et vers la gauche P^-, peuvent être calculées par les expressions suivantes :

$$P^+ = \frac{1}{2}\rho_o g \sum_{n=1}^{N} {c_n}^2 \frac{{\omega_n}^2}{g k_n \tanh(k_n d)} \frac{C_n}{2}\left[1 + \frac{2k_n d}{\sinh(2k_n d)}\right] \tag{45}$$

$$P^- = \frac{1}{2}\rho_o g \sum_{n=1}^{N} {c_{-n}}^2 \frac{{\omega_n}^2}{g k_n \tanh(k_n d)} \frac{C_{-n}}{2}\left[1 + \frac{2k_n d}{\sinh(2k_n d)}\right] \tag{46}$$

où ρ_o est la masse volumique de l'eau, C_n la célérité de l'énième composante de la houle ($C_n=\omega_n/k_n$, et $C_{-n}=\omega_{-n}/k_{-n}=-C_n$, car $\omega_{-n}=-\omega_n$ et $k_{-n}=k_n$). L'application du principe de la conservation d'énergie permet de déterminer la puissance dissipée D au voisinage de la structure immergée (par unité de largeur, entre les arrangements de sondes A et B), par :

$$D = {P_A}^+ + {P_A}^- - {P_B}^+ - {P_B}^- = \left|{P_A}^+\right| - \left|{P_A}^-\right| - \left|{P_B}^+\right| + \left|{P_B}^-\right| \tag{47}$$

où les indices A et B désignent que les puissances (ou énergies transmises par les houles progressives dans leur sens de propagation) sont déterminées à partir des arrangements de sondes A et B respectivement.

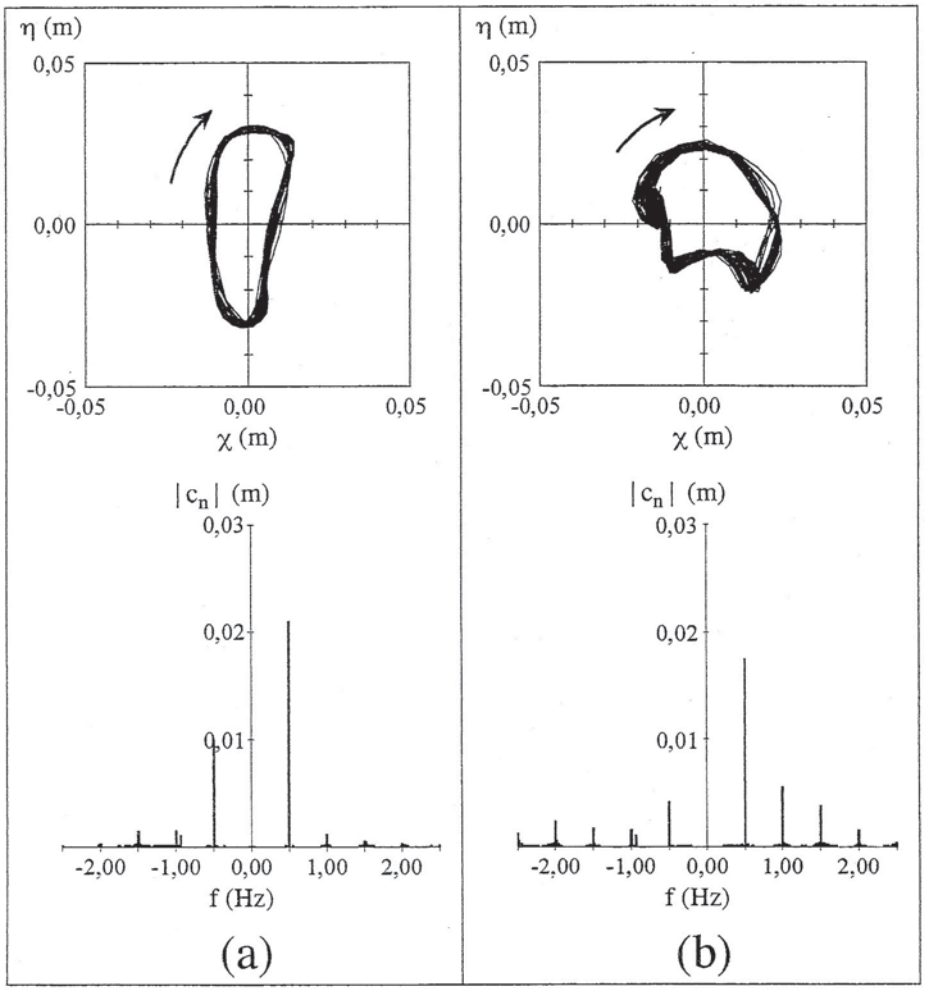


Figure 30 - Trajectoire dans le plan χ-η et amplitudes des coefficients de Fourier de η+iχ correspondant à l'essai n° 2 (H_{rms-i}=0.042 m).
(a) En face de la structure immergée. (b) Derrière la structure immergée.

La figure 32 montre, en fonction de la cambrure de référence de la houle incidente γ, les rapports suivants : D/P_A^+, $|P_A^-/P_A^+|$, et P_B^+/P_A^+. Il est très important de remarquer que pour H_{rms-i}<0,05 m (γ<0,0124) les vagues ne déferlent pas. Dans ces cas, la puissance dissipée évaluée représente entre 2% et 6% de l'énergie transmise par la houle incidente dans son sens de propagation. Le fait que la puissance dissipée évaluée pour γ<0,0124 soit toujours positive et relativement faible, prouve que les résultats sont très précis.

Pour une cambrure γ>0,0124, quand γ augmente, la puissance dissipée relative D/P_A^+ augmente, et la puissance transmise relative P_B^+/P_A^+ décroît, ce qui s'explique par le fait que le rapport $|P_A^-/P_A^+|$ reste pratiquement constant. L'augmentation de la puissance dissipée est due au déferlement des vagues qui devient de plus en plus important au fur et à mesure que la cambrure augmente.

Finalement, la figure 33 montre, en fonction de la cambrure γ, les racines carrées de $|P_A^-/P_A^+|$, de P_B^+/P_A^+, et de $|P_B^-/P_B^+|$, qui représentent respectivement un coefficient de réflexion moyen de la structure immergée, un coefficient de transmission de cette structure, et un coefficient de réflexion moyen de l'amortisseur placé à droite du canal.

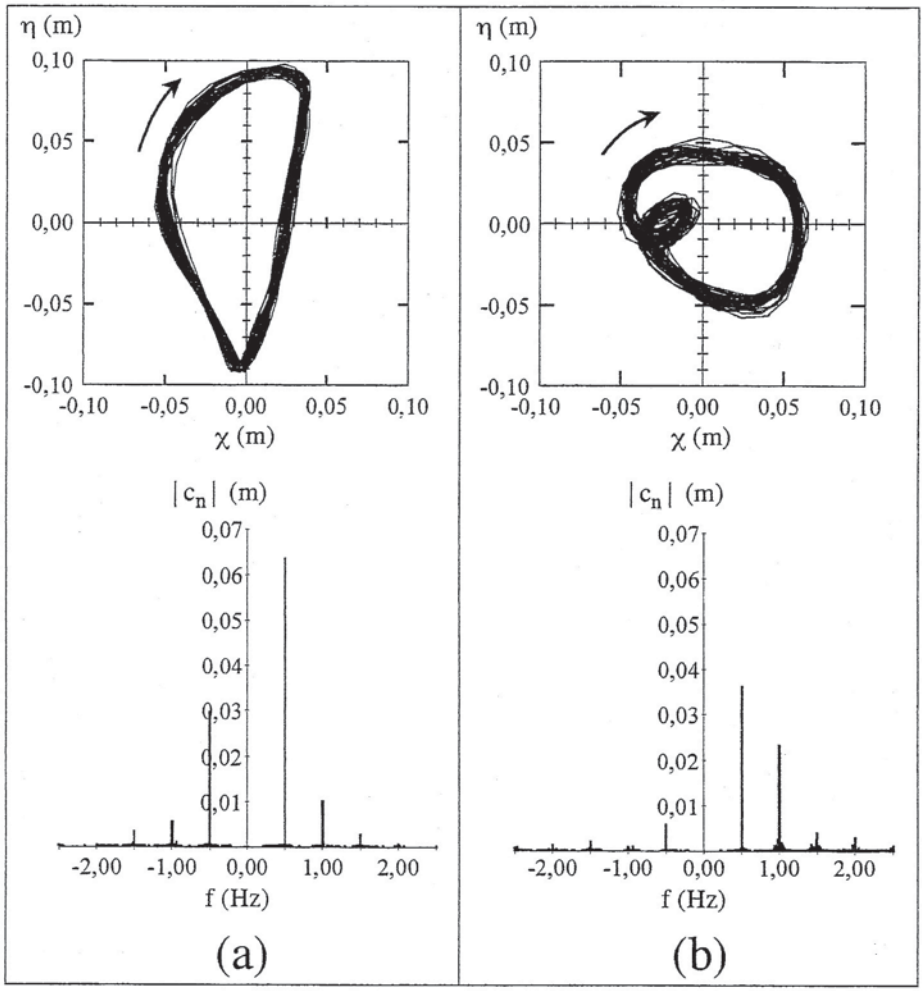


Figure 31 - Trajectoire dans le plan χ-η et amplitudes des coefficients de Fourier de η+iχ correspondant à l'essai n° 6 (H_{rms-i}=0,129 m).
(a) En face de la structure immergée. (b) Derrière la structure immergée.

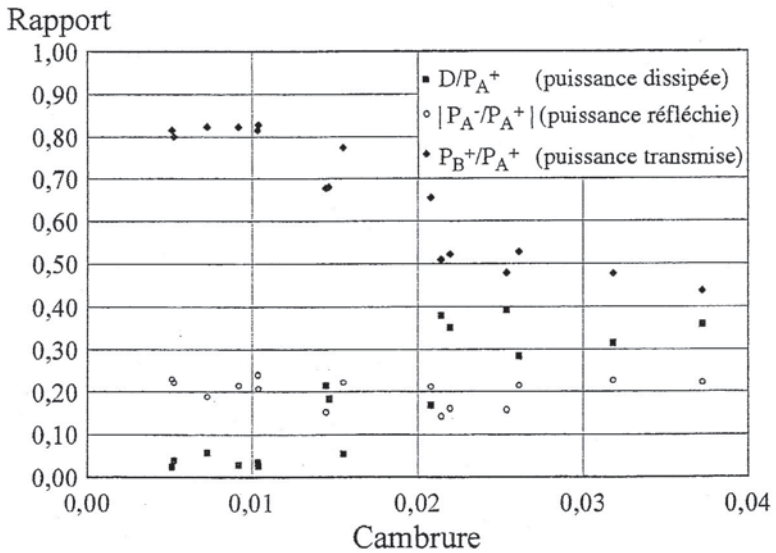


Figure 32 - Rapports D/P_A^+, $|P_A^-/P_A^+|$, et P_B^+/P_A^+, en fonction de la cambrure de référence de la houle incidente.

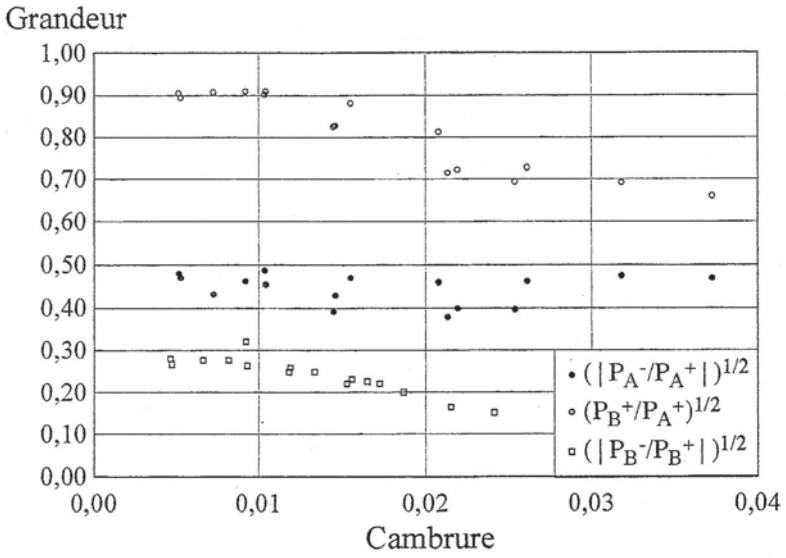


Figure 33 - Représentations en fonction de la cambrure de référence de la houle incidente de : $(|P_A^-/P_A^+|)^{1/2}$, définissant un coefficient de réflexion moyen K_{ps} de la structure immergée, $(P_B^+/P_A^+)^{1/2}$, définissant un coefficient de transmission moyen T_{ps} de la structure immergée, et $(|P_B^-/P_B^+|)^{1/2}$, définissant un coefficient de réflexion moyen K_{pa} de l'amortisseur de houle (la cambrure de référence pour $(|P_B^-/P_B^+|)^{1/2}$ est évaluée à partir de la hauteur moyenne quadratique de la houle qui aborde l'amortisseur).

Remarques : Les définitions des trois coefficients ci-dessus sont justifiées par le principe de la conservation d'énergie. La définition de K_{ps} est valable si $|P_B^-|<<|P_A^-|$, celle de T_{ps} est valable si $|P_B^-|<<|P_B^+|$, et celle de K_{pa} est justifiée dans tous les cas.

APPORTS DE LA MÉTHODE À LA COMPRÉHENSION DE LA RÉFLEXION

La méthode de séparation de deux houles se propageant en sens contraire basée sur les mesures des niveaux et des pentes de la surface libre présentée précédemment est très fiable et donne des résultats aussi précis que ceux obtenus par des méthodes vérifiées et validées par d'autres auteurs.

Cette méthode est probablement la seule à faire appel à la transformée discrète de Fourier pour examiner un signal complexe pour obtenir directement la phase et l'amplitude de toutes les composantes des houles incidente et réfléchie au point des mesures.

En effet, les amplitudes et les phases des coefficients de Fourier complexes de fréquences positives et négatives du signal $F(t)=\eta(t)+i\chi(t)$, correspondent aux amplitudes et aux phases des houles se propageant vers la droite et vers la gauche, respectivement, au point de mesures (selon la convention de signes retenue).

Ainsi, la transformée discrète de Fourier d'un signal complexe $F(t)=\eta(t)+i\chi(t)$ permet de séparer toutes les composantes associées à deux houles unidirectionnelles se propageant suivant des directions contraires dans un canal, de la même façon que la transformée discrète de Fourier d'un signal réel $\eta(t)$ permet de faire la même chose dans les traitements habituels utilisés pour étudier une houle purement progressive. Les éventuelles erreurs propres à ces deux méthodes sont alors principalement liées à la transformée discrète de Fourier. Ces

éventuelles erreurs sont dues au phénomène de repliement du signal ("aliasing") et à la non périodicité du signal dans la fenêtre d'observation ("leakage").

La séparation en un point fixe, de deux houles progressives se propageant en sens contraires dans un canal, permet les études du bilan énergétique pour évaluer la dissipation d'énergie entre deux points d'intérêt.

Notre méthode présente l'avantage de faciliter une compréhension du phénomène de réflexion. En effet, une bonne représentation de ce phénomène est réalisée à travers les trajectoires dans le plan χ-η. Ainsi, pour une houle incidente quasi-sinusoïdale, l'observation de cette trajectoire permet d'obtenir les résultats qualitatifs présentés à la suite.

a) Si la trajectoire dans le plan χ-η est circulaire, le mouvement résulte d'une houle purement progressive se propageant dans la direction de l'évolution de cette trajectoire au maximum de η.
b) Si la trajectoire dans le plan χ-η est elliptique, le mouvement résulte de la superposition de deux houles progressives se propageant selon deux directions contraires. Dans ce cas, l'angle entre l'axe focal de l'ellipse et l'axe Oη dépend de la position du point de mesures par rapport aux noeuds et ventres d'oscillation (figure 34).
c) Si la trajectoire dans le plan χ-η se développe sur une ligne (ellipse complètement aplatie), le mouvement résulte de la superposition de deux houles de même hauteur se propageant en sens contraires.
d) L'énergie transmise par la houle ou puissance est proportionnelle à la surface entourée par la trajectoire dans le plan χ-η.

Ces observations peuvent s'appliquer pour chaque bande de fréquence présente dans une houle aléatoire, à condition néanmoins que l'énergie dans cette bande ne soit pas négligeable.

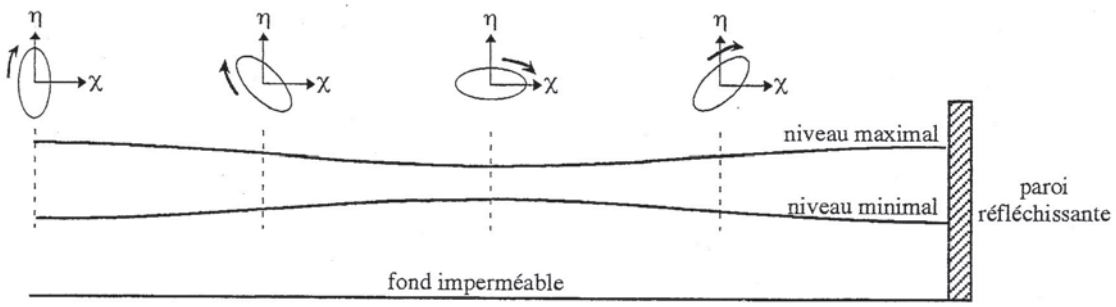


Figure 34 - Trajectoires dans le plan en fonction de la position par rapport aux noeuds et aux ventres d'oscillation en houle sinusoïdale.

Pour une houle périodique non monochromatique, l'observation des trajectoires dans le plan χ-η est particulièrement intéressante. En effet, la surélévation plus ou moins importante, du niveau équidistant entre crête et creux par rapport au niveau de repos, est visible sur cette trajectoire (voir figure 27, à la page 56).

Cette surélévation est un effet de faibles profondeurs engendrant l'apparition de composantes de deuxième et de troisième ordre dont la propagation est liée aux composantes de premier ordre. Les déphasages entre les composantes d'ordre différent au maximum de

$|\eta+i\chi|$ n'est pas aléatoire et ceci est à l'origine de la dissymétrie observée par rapport aux axes horizontale et vertical.

Enfin, l'application de notre méthode à l'étude de la réflexion des houles aléatoires permet aussi l'obtention de résultats originaux. L'observation des trajectoires dans le plan χ-η sur une durée de l'ordre de la période moyenne des vagues permet d'avoir une idée assez précise du flux d'énergie qui se produit au cours de cette durée et de connaître avec certitude la direction de ce flux.

Ceci est possible car on sait que le flux d'énergie est d'autant plus important que la surface entourée par la trajectoire au cours d'un cycle d'oscillation est grande. La direction de l'énergie transmise au cours d'une durée égale à la période moyenne des vagues est dirigée vers la droite si la trajectoire décrit globalement une orbite dans le sens des aiguilles d'une montre ou vers la gauche dans le cas contraire.

Une description du flux d'énergie (ou puissance de la houle, ou encore, énergie transmise) en fonction du temps est ainsi possible, ce qui permet de connaître la direction de ce flux à chaque instant et ses valeurs de pointe.

RÉFÉRENCES EN RELATION AVEC L'AGITATION PORTUAIRE ET LA PROPAGATION DE LA HOULE

Mémoires de DEA : DEA.7, DEA.8, DEA.11, DEA.13, DEA.14, DEA.16
Projets de fin d'études : EN.3
Articles : A.8
Communications : B.7, B.8, B.14
Rapports d'études : C.6, C.7, C.9

CHAPITRE IV

ACTIVITÉS LIÉES A L'ENSEIGNEMENT, À L'ADMINISTRATION ET À LA RECHERCHE

ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT

ENSEIGNEMENT EN PREMIER ET EN DEUXIÈME CYCLE

En 1992, juste après la soutenance de ma thèse, j'ai débuté mes activités d'enseignement. De 1992 à 1994 j'ai enseigné la physique (mécanique, électricité et optique) en DEUG A et DEUG B, à la Faculté des Sciences et des Techniques de Nantes.

Depuis 1994, j'exerce la plus grande partie de mon enseignement dans la Maîtrise des Sciences et Techniques de Travaux Publics et Maritimes de la Faculté des Sciences et de Techniques de Nantes, et depuis cette année j'enseigne en IUP Génie Civil et Infrastructures, formation se substituant à la précédente. Mes activités d'enseignement (ainsi que mes travaux de recherche) concernent principalement la mécanique des fluides, l'hydraulique maritime et les travaux portuaires.

Dans les années précédentes et jusqu'en septembre 1997, j'ai participé aux enseignements du CNAM de Nantes en mécanique industrielle pour les étudiants préparant le DUT de génie mécanique, et en géotechnique pour les étudiants préparant le diplôme de 2ème cycle des techniques de construction. Cependant, étant bénéficiaire d'une prime d'encadrement doctoral et de recherche depuis cette date, j'ai arrêté toutes mes activités d'enseignement à l'extérieur de l'université de Nantes.

Le détail de mes enseignements de l'année universitaire 1998-1999 est présenté ci-après.

En 2ème année de MST-TPM (travaux publics et maritimes) :

Hydraulique maritime	:	18 heures de cours et 18 heures de T.D.
Mécanique des fluides	:	9 heures de cours et 9 heures de T.D.
Construction portuaire	:	10,5 heures de T.D.
Routes et V.R.D.	:	3 heures de cours et 2 heures de T.D.
Techniques d'expression	:	10,5 heures de T.D.

En 2ème année d'IUP génie civil et infrastructures :

Mécanique des fluides	:	18 heures de cours, 18 heures de T.D. et 24 heures de T.P.
Mathématiques 2	:	12 heures de cours et 12 heures de T.D.

En maîtrise d'ingénierie mathématique :

Mécanique des fluides	:	10 heures de cours et 15 heures de T.D.

En licence de géologie :

Statistiques appliquées aux risques climatiques : 4 heures de T.D.

ENSEIGNEMENT EN TROISIÈME CYCLE

Une partie de mes activités d'enseignement sont effectuées en troisième cycle, dans le cadre du DEA de génie civil, option génie côtier, commun à l'université de Nantes et autres institutions. Le détail de ces enseignements est le suivant :

1992-1994 : 4 h de cours, hydraulique des estuaires, DEA génie civil option génie côtier, Faculté des Sciences de Nantes (Université de Nantes, Ecole Centrale de Nantes, INSA de Rennes, Université du Havre).

1994-1995 : 12 h de cours, la marée, hydraulique des estuaires, travaux maritimes, DEA génie civil option génie côtier, Faculté des Sciences de Nantes (Université de Nantes, Ecole Centrale de Nantes, INSA de Rennes, Université du Havre).

1996-2000 : 7,5 h de cours, environnement marin - la houle, Faculté des Sciences de Nantes (INSA de Rennes, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, Université du Havre, Université de la Rochelle).

ACTIVITÉS D'ADMINISTRATION ET AUTRES RESPONSABILITÉS COLLECTIVES

Conseiller technique du Centre Français du Littoral depuis 1992, je me suis occupé intégralement de 9 contrats de recherche. Dans ces contrats j'ai assumé les responsabilités de négociation, de réalisation et du suivi des études. Les contrats du Centre Français du Littoral concernent d'une part, les recherches appliquées intéressant les municipalités et les organismes du secteur public, et d'autre part, les études destinées à l'exportation réalisées en collaboration avec des entreprises privées.

Dans le cadre de la MST de Travaux Publics et Maritimes, je suis directeur des études et j'assure la réalisation des emplois du temps, la programmation des cours, TD et TP, le contact avec les intervenants professionnels et extérieurs, la déclaration d'heures d'enseignement de chaque intervenant, la préparation des conventions de stage, et toutes les tâches administratives pratiques liées à cette formation.

Au sein du DEA Génie Civil pour les cours de l'option Génie Côtier qui se déroulent à la Faculté des Sciences et des Techniques de l'Université de Nantes, je m'occupe de la préparation des cours, de la réservation des salles et autres tâches administratives.

De plus, je suis co-responsable de l'unité de valeur Géotechnique B6 faisant partie du cursus des étudiants du CNAM de Nantes en Techniques de Construction.

J'ai participé activement à la mise en place de l'IUP de Génie Civil de Nantes - St. Nazaire, en tant que membre de son comité de pilotage. Ce comité était constitué de 10 membres : 5 de l'IUT de St. Nazaire et 5 de la Faculté des Sciences et des Techniques de l'université de Nantes.

En outre, je suis membre suppléant de deux commissions de spécialistes de l'Université de Nantes : 60ème section (Génie Civil, Génie Mécanique et Mécanique), et 34ème, 35ème et 36ème sections (Astronomie Physique, Physique et Chimie de la Terre, Géologie et Paléontologie).

Enfin, depuis 1994 j'ai participé à la préparation et à l'organisation des Quatrièmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier qui ont eu lieu à Dinard en avril 1996, et des Cinquièmes Journées qui ont eu lieu à Toulon en mai 1998. J'ai pris en charge la réalisation et la mise en page des Comptes Rendus des Journées de Toulon. Actuellement, je participe à l'organisation des Sixièmes Journées qui auront lieu à Caen en mai 2000.

ENCADREMENT DE RECHERCHES

ENCADREMENT ET CO-ENCADREMENT DE THÈSES

Depuis 1992 j'ai participé à l'encadrement de 3 thèses de doctorat. Ma première participation concerne une thèse qui était en cours. Par la suite, j'ai encadré intégralement deux thèses, mais seulement pour la dernière j'ai obtenu une dérogation pour figurer comme directeur de thèse. En plus, il est prévu, en accord avec le Professeur Grovel, qu'à partir de l'année prochaine, je serai le responsable des travaux d'une thèse qui vient de commencer.

Les thèses concernées et les références des documents issus de ces collaborations, sont présentées ci-dessous.

[T.1] GHADRI H. (1994) La marée de l'ingénieur du génie civil - prévision des surcotes, *Thèse de doctorat*, Université de Nantes, Nantes, France, 168 p.
encadrement à 20 % - directeur de thèse : A. Grovel
références : A.7

[T.2] OURAQ Y. (1996) Contribution à l'étude du comportement des sédiments dans l'environnement estuarien : cas de l'estuaire de la Loire, *Thèse de doctorat*, Université de Nantes, Nantes, France, 169 p.
encadrement à 80 % - directeur de thèse : A. Grovel
références : B.10

[T.3] HOSSEINI K. (1999) Liaisons entre la rigidité initiale et la cohésion non drainée dans les vases molles en relation avec la dynamique sédimentaire, *Thèse de doctorat*, Université de Nantes, Nantes, France, 167 p.
encadrement à 100 % - directeur de thèse : M. Sanchez
références : A.6, A.9, B.11, B.12, B.15, B.16

ENCADREMENT DE DEA

Au cours de ces 8 dernières années, j'ai encadré 16 mémoires de DEA, dont 11 d'une façon intégrale et 5 en collaboration. Pour l'année universitaire en cours, je participe à l'encadrement de 2 DEA. Ces travaux et les références des documents issus des collaborations sont présentés ci-dessous.

[DEA.1] LE BORGNE M. A. (1992) Optimisation d'une darse en estuaire pour une sédimentation minimale, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 89 p.
références : B.3, C.2

[DEA.2] CHIPE N. (1993) Analyse statistique et approches empiriques de la surcote : application à la pointe de St. Gildas, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 38 p.

[DEA.3] GRUAU J. (1993) Étude d'une vanne régulatrice en Loire. Etude sédimentologique du site, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 46 p.

[DEA.4] COUSSEAU E. (1994) Dynamique longitudinale de la crème de vase en Loire, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 58 p.

[DEA.5] LEROY D. (1994) Tsunamis, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 52 p.

[DEA.6] RYBSKI P. (1995) Passage en revue (recherche - développement) des différents modes de dévasement du port de plaisance de Morlaix, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 96 p.
références : C.8

[DEA.7] CHARDIN F. (1995) Modélisation de la diffraction dans un bassin. Etude des conditions aux limites, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 38 p.

[DEA.8] CHEVALIER C. (1995) La houle réelle dans une mer formée. Modélisation appliquée au spectre de Pierson-Moskowitz, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 70 p.
références : B.7

[DEA.9] HOSSEINI K. (1995) Conditions critiques d'érosion des vases molles. Comparaison entre la rigidité initiale mesurée à l'aide d'un rhéomètre Brookfield LVT et la cohésion non drainée déterminée en utilisant un densimètre, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 44 p.
références : voir T.3

[DEA.10] VRIGNAUD C. (1995) Modélisation multicouches de l'estuaire de la Loire, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 58 p.

[DEA.11] AUDUSSEAU M. (1996) Mesure globale de l'agitation en modèle réduit bidimensionnel à l'aide de moyens photographiques, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 45 p.

[DEA.12] LUCAS J.-M. (1996) Étude du désenvasement d'un port fermé, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 52 p.

[DEA.13] LE FLOCH C. (1996) Mesure simultanée de la marée et des oscillations portuaires, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 73 p.

[DEA.14] LE MOAL M. (1996) Mesure indirecte du coefficient de réflexion, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 35 p.

[DEA.15] BALLAY A. (1998) Étude du taux d'érosion d'une vase d'estuaire, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 77 p.

[DEA.16] DESROIS J. (1998) Approches sur un spectre directionnel de la houle, *DEA génie civil option génie côtier*, Université de Nantes, Nantes, 83 p.

ENCADREMENT DE PROJETS DE FIN D'ÉTUDES DE L'ÉCOLE NAVALE DU POULMIC

[EN.1] CHARRIER, DESMET (1992) Expérimentation de dévasage par agitation, *Projet de fin d'études de l'Ecole Navale et Groupe-Ecoles du Poulmic*, Lanvéoc-Poulmic, 29240 Brest Naval, 47 p.
références : B.3

[EN.2] CARTERON, GUIGO (1994) Etude hydrosédimentaire du bras de la Madeleine. *Projet de fin d'études de l'Ecole Navale et Groupe-Ecoles du Poulmic*, Lanvéoc-Poulmic, 29240 Brest Naval, 65 p.

[EN.3] MARICHY, PIHET (1997) Étude d'un houlographe directionnel, *Projet de fin d'études de l'Ecole Navale et Groupe-Ecoles du Poulmic*, Lanvéoc-Poulmic, 29240 Brest Naval, 56 p.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Mes études et recherches sont effectuées dans le cadre du génie côtier appliqué aux travaux maritimes et à l'aménagement côtier. La plupart de ces études sont réalisées en collaboration avec des collègues chercheurs, des doctorants et des étudiants en DEA. Trois principaux thèmes sont abordés :

1) les processus sédimentaires des vases,
2) les problèmes hydrosédimentaires dans les estuaires et les zones côtières,
3) l'agitation portuaire.

Le premier thème constitue une recherche fondamentale dont le but est la description mathématique des différents processus sédimentaires affectant les matériaux cohésifs, en relation avec leur comportement mécanique et avec les actions hydrodynamiques.

Pour ce faire, je fais appel à des modèles faisant intervenir les principaux paramètres de chaque processus. Tout s'appuie sur un principe que je me suis fixé, celui-ci étant de considérer exclusivement des paramètres pouvant être évalués d'une façon fiable, grâce à des protocoles établis pour des mesures sur le terrain et en laboratoire.

La dynamique sédimentaire des matériaux cohésifs reste un problème complexe du fait de la multiplicité des processus qui interviennent (transport, floculation, sédimentation, tassement, érosion) et de la hétérogénéité naturelle de ces matériaux. Les modèles que j'utilise sont les plus simples possibles et ils ne considèrent que les paramètres les plus importants.

Ceci ne veut pas dire que ces modèles sont simplistes, au contraire, il s'agit de modèles "robustes" qui s'accordent avec les expérimentations et reproduisent les principaux phénomènes observés.

Je fais attention à ce que les modèles de processus sédimentaires sur lesquels je travaille soient compatibles avec les résultats et les apports du plus grand nombre de chercheurs qui travaillent sur ces problèmes.

Les principales contributions de mes études à la description des processus sédimentaires affectant les matériaux cohésifs sont présentées dans ce qui suit.

- La mise au point d'une modélisation fiable du tassement des vases molles tenant compte du coefficient de perméabilité (qui est le paramètre principal de ce problème), et de sa variation avec la concentration.

  Ainsi, notre modèle "iso-concentration" de tassement a pu être appliqué pour simuler le tassement d'un grand nombre de matériaux. Une méthodologie bien définie et claire, basée sur l'analyse graphique des courbes expérimentales de tassement, permet l'ajustement de ce modèle.

  Notre modèle permet d'expliquer la formation de crème de vase comme le résultat d'un dépôt très rapide des matières en suspension. Les conditions critiques d'apparition de cette

formation en Loire, ont pu être établies en fonction d'un seuil du taux de dépôt au-dessus duquel la crème de vase se forme.

- La mise au point d'une méthodologie originale pour caractériser le comportement mécanique des vases molles par la mesure de la cohésion non drainée à l'aide d'un densimètre du type torpille. Le lien entre cette cohésion et la rigidité initiale (qui est un paramètre plus couramment utilisé pour ces matériaux) a été établi.

  Une notion statistique a été introduite pour interpréter les différentes mesures des paramètres caractéristiques du comportement rhéologique des vases.
- L'établissement d'une loi pour le taux volumique d'érosion ajustée à partir de mesures en laboratoire pour les vases de Loire recouvrant pratiquement toutes les concentrations observées sur le site.

  Cette loi fait intervenir les contraintes hydrodynamiques dues à un courant et le comportement rhéologique des vases. Les mesures ont montré l'importance du comportement rhéologique des vases sur les mécanismes d'érosion observés.

  On a montré aussi que l'érosion de vases plastiques se produit par l'arrachement d'agrégats de forte rigidité leur permettant de conserver leur structure en tant que matière en suspension. La concentration de ces agrégats est voisine de celle du dépôt dont ils proviennent et leur taille terminale est de l'ordre de 1 à 2 mm.

L'influence des différents paramètres sur les processus sédimentaires a été étudiée, à savoir :

- l'influence de la température sur la rigidité initiale des vases molles,
- l'influence de la salinité sur la phase initiale du tassement,
- influence de la concentration sur la vitesse de chute des sédiments.

Mon deuxième thème d'étude représente une recherche appliquée faisant appel aux résultats issus des travaux sur les processus sédimentaires, ainsi que de ceux obtenus par les recherches effectuées par différents auteurs.

Dans nos études sur les problèmes hydrosédimentaires, l'estuaire de la Loire occupe une place privilégiée, la Loire étant souvent notre site expérimental de référence.

La description mathématique des principaux processus sédimentaires doit permettre, à moyen terme, la construction des modèles bi et tridimensionnel fiables, simulant la dynamique globale des sédiments cohésifs dans les estuaires dans leur ensemble. Ces modèles représentent potentiellement un outil d'aide à la gestion de ces sites. Ils peuvent permettre l'optimisation des dragages d'entretien, la mise en œuvre de solutions visant à améliorer la qualité des eaux, et l'évaluation de l'impact sur l'environnement lié aux projets d'aménagement.

Les observations sur le site seront toujours nécessaires : d'abord, pour identifier les principaux problèmes (envasements, érosions, affouillements, dynamique des formations turbides, qualité des eaux, etc.), mais aussi pour l'ajustement des modèles mathématiques.

Dans le but de permettre une évaluation de l'impact des travaux d'aménagement sur la dynamique sédimentaire, j'ai mis au point ou amélioré, des modèles simplifiés, découplés des modèles hydrodynamiques qui sont indispensables pour prévoir l'évolution des courants. Ces modèles permettent l'étude de trois types de problèmes décrits et présentés à la suite.

- L'augmentation des vitesses du courant, qui se traduit éventuellement par une érosion des fonds. Ce phénomène peut être modélisé grâce à la connaissance des propriétés rhéologiques des sédiments en surface et de leur comportement sous une action hydrodynamique.
- La diminution des vitesses qui se traduit par un incrément du taux d'envasement affectant les dragages d'entretien. Pour étudier ce problème on doit connaître la relation entre les propriétés rhéologiques des sédiments et les lois d'érosion. De plus, le gradient de concentration dans la crème de vase, résultant du tassement, est ici un paramètre très important.
- Les dragages des souilles, qui peuvent s'accompagner par des taux d'envasement excessivement élevés selon le site. L'identification in situ des zones susceptibles d'être envahies par des formations de crème de vase en mortes-eaux permet d'éviter l'emplacement des souilles à des endroits où les dragages d'entretien risquent d'être trop fréquents.

La précision des résultats pouvant être obtenus par ces approches est étroitement liée à la connaissance des propriétés mécaniques des sédiments et de la sédimentologie globale du site, de même qu'à la qualité de la modélisation hydrodynamique. Les mesures in situ et en laboratoire sont donc, très importantes.

La modélisation du tassement de la crème de vase et l'observation de sa dynamique au cours d'un cycle semi-lunaire de marées, ont permis l'évaluation d'un taux d'envasement résiduel du chenal de l'estuaire de la Loire d'un ordre de grandeur comparable à celui estimé par d'autres chercheurs en se basant sur des observations in situ.

Les campagnes de mesure en Loire nous ont permis d'acquérir une connaissance du site. Des relevés ponctuels du volume des sédiments accumulés dans les formations de crème de vase en mortes-eaux ont montré que la masse turbide totale présente dans l'estuaire subit d'importantes variations dans le temps en relation avec les conditions climatiques.

Nous préconisons le suivi régulier des formations de crème de vase en mortes-eaux, comme un moyen de prévision de l'importance du bouchon vaseux lors des vives-eaux suivantes, car ce bouchon résulte principalement de la remise en suspension des sédiments contenus dans ces formations. Je travaille actuellement à l'établissement d'un protocole pour

des campagnes de suivi de la crème de vase permettant cette prévision de l'importance du bouchon vaseux avec une semaine d'anticipation. Par la suite, les mesures pourront être réalisées par un observatoire de l'estuaire de la Loire en cours de création.

En perspective, j'envisage, à court terme, la réalisation en Loire de campagnes de mesures spécialisées consistant à suivre dans son déplacement par le courant, l'évolution des matières en suspension au cours d'un cycle de marée. Ces mesures doivent permettre l'évaluation de 4 paramètres majeurs intervenant dans la dynamique sédimentaire :

- la vitesse de dépôt des sédiments V_s,
- le coefficient de diffusion verticale de masse ε,
- le taux de dépôt Q_D,
- le taux volumique d'érosion E_v.

Les valeurs de ε et Q_D seront mises en relation avec la tension de cisaillement au fond τ_o évaluée à partir de la mesure du profil des vitesses. Les valeurs de E_v seront mises en relation avec τ_o et avec les caractéristiques des matériaux du fond par le biais de la rigidité initiale de ceux-ci.

Une étude faisant appel à des campagnes de ce type a été réalisée récemment dans l'estuaire de la Seine par un chercheur travaillant sur ce site. De même, une étude de DEA est en cours sous ma direction, et le début d'une thèse de doctorat est prévu pour octobre 2000, dans le cadre d'un contrat de collaboration entre l'université de Nantes et autres institutions.

Dans le cadre d'une deuxième étude en collaboration avec d'autres chercheurs, j'envisage la réalisation d'une recherche sur les relations entre l'agitation liée à la propagation de la houle et les conditions d'envasement en milieu marin. Des campagnes de mesure dans les zones adjacentes de l'estuaire de la Loire doivent permettre l'identification des sites soumis à l'envasement. La caractérisation en laboratoire du comportement mécanique sur des échantillons des sédiments déposés et l'analyse de la réfraction de la houle suivant les sites, permettront l'étude de l'érosion et du dépôt des sédiments cohésifs, en relation avec leur comportement mécanique et les actions hydrodynamiques résultant de la propagation de la houle. Une recherche de thèse, dont je prendrai la direction, s'inscrit dans le cadre de ce projet

Mon troisième thème de recherche est en relation avec l'agitation portuaire. La modélisation numérique de la propagation de la houle dans un bassin, a montré que la houle incidente et les réflexions par les frontières latérales jouait une importance de premier ordre sur l'agitation portuaire. Dans la mesure du possible, les ports devraient être munis de parois absorbantes, surtout, sur les frontières où une incidence directe de la houle venant de l'extérieur du port est observée.

En tout état de cause, la mesure fiable du coefficient de réflexion en laboratoire et in situ est une nécessité pour les ingénieurs qui proposent des solutions pour atténuer l'agitation.

Au cours de mes recherches, j'ai participé à la mise au point d'une méthode originale d'évaluation de la réflexion liée aux frontières latérales au domaine maritime. Cette méthode est basée sur la mesure de deux grandeurs caractérisant l'état de la mer à chaque instant : le niveau et la pente de la surface de l'eau.

Notre méthode est compatible avec le principe de la conservation d'énergie et ceci permet les études basées sur un bilan énergétique pour évaluer la dissipation de l'énergie de la houle entre deux points fixes.

Au cours de l'année 2000-2001, j'envisage la réalisation d'une série de mesures en laboratoire, en canal à houle, dans le but d'étudier l'évolution à l'approche des côtes, des composantes harmoniques de la houle de second ordre. Cette étude expérimentale doit permettre une évaluation précise des vitesses des particules d'eau, liées à la propagation des vagues en faibles profondeurs, ce qui est nécessaire pour l'évaluation des conditions critiques de mise en mouvement des sédiments. Dans cette étude, les mesures seront traitées grâce à une technique de séparation des composantes harmoniques que j'ai mise au point.

D'une façon générale, dans l'avenir je compte réaliser des recherches dans la continuité de mes études passées. La collaboration avec d'autres chercheurs dans le cadre de projets pluridisciplinaires est aussi l'un de mes objectifs.

Enfin, mon objectif principal est l'encadrement de recherches de thèse et de DEA dans le domaine du génie côtier, en relation avec les meures in situ, l'expérimentation en laboratoire et la modélisation mathématique.

J'espère ainsi, que l'approfondissement des connaissances dans les trois principaux thèmes sur lesquels je travaille, pourra ouvrir des voies de recherches pour les jeunes chercheurs. Je compte aussi, pouvoir m'intégrer dans une équipe universitaire intéressée par ces recherches et par les activités d'enseignement liées.

ANNEXE A

CURRICULUM VITAE

Martin SANCHEZ ANGULO
né le 14 juillet 1962
de nationalité mexicaine

Etudes

1985	*Ingénieur en Génie Civil,*
	Institut National Polytechnique de Mexico, 8 novembre 1985
1988	*Master en sciences en Hydraulique,*
	Institut National Polytechnique de Mexico, 29 avril 1988
1992	*Thèse de doctorat, Sciences pour l'ingénieur,*
	Université de Nantes, 12 juillet 1992

Fonctions

Maître de conférences, 2e classe à l'UFR-Sciences de Université de Nantes
Date de nomination : 1er septembre 1996
Date de promotion : 16 juillet 1998

Enseignement universitaire

1992-1995 :	*ATER,*
	enseignement en premier cycle DEUG B et DEUG A et
	en deuxième cycle en MST-TPM (Travaux Publics et maritimes)
1995-1996 :	*Maître de conférences stagiaire,*
	enseignement en MST-TPM
1996-2000 :	*Maître de conférences titulaire,*
	enseignement en MST-TPM et
	en IUP génie civil et infrastructures

Encadrement doctoral

16 mémoires de DEA Génie Côtier, depuis 1992
2 thèses co-encadrées, soutenues en 1994 et 1996
1 thèse encadrée soutenue en 1999

ANNEXE B

LISTE DES PUBLICATIONS

Thèse

[A.1] SANCHEZ M. (1992) Modélisation dans un estuaire à marée - Rôle du bouchon vaseux dans la tenue des sols sous-marins. *Thèse de doctorat*, Université de Nantes, Nantes, France, 210 p.

A. Publications dans des revues scientifiques et des livres à comité de lecture

[A.2] SANCHEZ M., GROVEL A. (1993) Modélisation du tassement sous poids propre des couches de vase molle et saturée, sur un fond imperméable. *La Houille Blanche*, n° 1 : 29-34.

[A.3] SANCHEZ M., GROVEL A. (1994) Settlement: a sedimentary process, *Sediment Transport in Coastal Environments and Rivers*, Euromech 310, World Scientific Publishing Ltd. : 146-151.

[A.4] SANCHEZ M., GROVEL A. (1994) Dynamique des matériaux cohésifs dans l'estuaire de la Loire. *Journal de Recherche Océanographique*, Vol. 19, n° 3 et 4 : 196-201.

[A.5] SANCHEZ M., GROVEL A. (1995) Rôle de la crème de vase dans la dynamique sédimentaire : cas de l'estuaire de la Loire (Role of the pseudo-plastic mud in sediment dynamics: the Loire estuary, France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Gauthier-Villars, t. 320, série IIa : 1095-1100.

[A.6] HOSSEINI K., SANCHEZ M. (1999) Expérimentation de l'érosion d'une vase de Loire sous l'action d'un courant. *Journal de Recherche Océanographique*, Vol. 24, n° 1 : 19-24.

[A.7] GROVEL A., SANCHEZ M., GHADRI H., DELANOË Y. (1999) Modifications de la marée par le creusement du chenal d'un estuaire (Modification in the observed tide levels due to dredging works in the channel of an estuary). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Springer-Verlag, Vol. 57 : 369-376.

[A.8] SANCHEZ M. (2000) Estimation du coefficient de réflexion en canal à houle (Estimation of the boundary reflection coefficient in a flume). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Elsevier, t. 328, série IIb : 883-889.

[A.9] SANCHEZ M., GROVEL A., HOSSEINI K. (2000) Impact sédimentaire des travaux d'aménagement de l'estuaire de la Loire (Sedimentary impact of planning works in the Loire estuary, France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Springer-Verlag, Vol. 59 : 239-246.

B. Communications dans les congrès avec actes et comité de lecture

[B.1] SANCHEZ M., GROVEL A. (1992) Consolidation sous contraintes variables, IIèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, ISBN-2-9505 787-1-3, Nantes, février : 421-436.

[B.2] SANCHEZ M., GROVEL A. (1994) Le tassement des vases comme processus sédimentaire, IIIèmes Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, ISBN-2-908912-21-X, Sète, février : 69-73.

[B.3] SANCHEZ M., LE BORGNE M.A., RAMSTEIN B., CHARRIER P., DESMET V., RAMEL C. (1994) Etude de l'envasement du port-abri de Trentemoult, IIIèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, ISBN-2-908912-21-X, Sète, février : 89-94.

[B.4] FATTAL P., GROVEL A., SANCHEZ M., DELANOË Y. (1994) Problèmes d'un estuaire aménagé : La Loire vers une recherche de solutions concertées, IIIèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, ISBN-2-908912-21-X, Sète, février : 127-132.

[B.5] SANCHEZ M., GROVEL A. (1994) Sédimentation sur un fond perméable, Premier Congrès International sur la géotechnique environnementale. Edmonton, Canada, July, 6 p.

[B.6] SANCHEZ M. (1995) Modèles hydrosédimentaires centrifugés : les possibilités, Colloque les Modèles Réduits en Génie Civil , ISBN 2-9509268-0-0, Nantes, mai : 207-214.

[B.7] CHEVALIER C., SANCHEZ M. (1996) Modélisation de la houle réelle appliquée au spectre de Pierson-Moskowitz, IVèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, ISBN-2-9505 787-2-1, Dinard, avril : 13-22.

[B.8] SANCHEZ M. (1996) Conditions aux limites liées à la réflexion de la houle et distribution des énergies dans un bassin portuaire, IVèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, ISBN-2-9505 787-2-1, Dinard, avril : 33-42.

[B.9] FATTAL P., SANCHEZ M., DELANOË Y. (1996) Comportement hydraulique de deux bras de la Loire (Pirmil et Madeleine) à Nantes, IVèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, ISBN-2-9505 787-2-1, Dinard, avril : 177-186.

[B.10] OURAQ Y., SANCHEZ M., GROVEL A. (1996) Influence de la salinité et de la concentration initiale sur le tassement d'une vase de Loire, IVèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, ISBN-2-9505 787-2-1, Dinard, avril : 325-332.

[B.11] HOSSEINI K., SANCHEZ M., GROVEL A. (1996) Rhéologie des vases molles, IVèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, ISBN-2-9505 787-2-1, Dinard, avril : 507-514.

[B.12] HOSSEINI K., SANCHEZ M., GROVEL A. (1996) The different processes of cohesive sediments, Second International conference on coasts, ports and marine structures, ICOMPAS, Theran, Iran, December : 138-149.

[B.13] SANCHEZ M., GROVEL A., DELANOË Y., FATTAL P. (1996) Aspects sédimentologiques de l'estuaire de la Loire, 24èmes Journées de l'Hydraulique, Congrès de la société hydrotechnique de France, ISBN 2.906831.30.1, Paris, septembre : 341-350.

[B.14] SANCHEZ M. (1998) Agitation portuaire : mesure et modélisation, Vèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, ISBN-2-9505 787-3-X, Toulon, mai : 55-64.

[B.15] HOSSEINI K., SANCHEZ M., GROVEL A. (1998) Etude du taux d'érosion des vases de Loire en laboratoire, Vèmes Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, ISBN-2-9505 787-3-X, Toulon, mai : 121-128.

[B.16] HOSSEINI K., SANCHEZ M. (1998) Erosion and cohesion relationships of cohesive sediments, Third International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures, ICOMPAS, Theran, Iran, December : 379-388.

C. Rapports d'études

[C.1] SANCHEZ M. (1992) Application du modèle iso-concentration de tassement des vases molles dans la simulation des vases étudiées au Laboratoire Central d'Hydraulique de France, Rapport CFL-92-006, octobre.

[C.2] GROVEL A., ORGERON C., SANCHEZ M., LE BORGNE M.A., LEVACHER D. (1993) Etude de l'envasement du port-abri de Trentemoult, Rapport final CFL-93-001-Mairie de Rezé, janvier.

[C.3] SANCHEZ M. (1993) Etude des caractéristiques d'un matériau de Honfleur, Rapport CFL-Fondaconcept, juin.

[C.4] GROVEL A., KHALIFA A., SANCHEZ M. (1993) Etude de conception du brise-lames et étude sédimentologique du projet de port nommé *Straits Marine Resorts*, Rapport CFL-93-002-Marine Technology and Construction Pte. Ltd., juillet.

[C.5] FATTAL P., SANCHEZ M., FREGARD V., GROVEL A., DELANOË Y. (1993) Etude du bras de la Madeleine en aval du pont A. de Bretagne. Elargissement du bras et évolution du fond, Rapport CFL-93-003-Mairie de Nantes, octobre.

[C.6] SANCHEZ M., GROVEL A. (1994) Coastal engineering study for a projected tourist development at Port Dickson, Malaysia, Rapport CFL-94-Marine Technology and Construction Pte. Ltd., décembre.

[C.7] SANCHEZ M., GROVEL A. (1995) Etude hydrodynamique d'un port à Pulau Besar, Malaisie, Rapport CFL-95-002-Marine Technology and Construction Pte. Ltd., mars.

[C.8] GROVEL A., SANCHEZ M., RYBSKI P. (1995) Recherche et développement des différents modes de dévasement du port de plaisance de Morlaix, Rapport CFL-95-SIVOM de Morlaix, juillet.

[C.9] SANCHEZ M., GROVEL A., OCIO M. (1995) Etude du port de plaisance de Dieppe, Rapport CFL-95-004-Quille, septembre.

[C.10] FATTAL P., SANCHEZ M., DELANOË Y., ANDRÉ S., GROVEL A. (1997) Evolution des bras de la Madeleine et Pirmil à Nantes et conséquences sur le milieu, Rapport CFL-97-Ville de Nantes, juin.

[C.11] SANCHEZ M., GROVEL A. (1997) Oscillations de la marée dans un bassin communiquant avec la mer - Etude du fonctionnement hydraulique du canal du Rove dans l'étang de Berre, Rapport CFL-97-Ramade, septembre.

[C.12] SANCHEZ M., GROVEL A. (1998) Rapport final de l'expertise sédimentologique du port du Légué - Saint Brieuc, Rapport CFL-98-BCEOM, avril.